

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
"КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ ІМЕНІ ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО"

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
"КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ ІМЕНІ ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО"

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

Трінчук Данило Ярославович

УДК 621.316

ДИСЕРТАЦІЯ

**ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ПЕРЕТВОРЕННЯ ЕНЕРГІЇ В
НЕЛІНІЙНИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ КОЛАХ ЗІ ЗМІННИМ
НАВАНТАЖЕННЯМ**

05.09.05 – теоретична електротехніка

Подається на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

_____ Д.Я. Трінчук

Науковий керівник: **Островерхов Микола Якович**
доктор технічних наук, професор

Київ – 2019

АНОТАЦІЯ

Трінчук Д.Я. Підвищення ефективності перетворення енергії в нелінійних електричних колах зі змінним навантаженням. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук (доктора філософії) за спеціальністю 05.09.05 «Теоретична електротехніка» (141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка). – Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, 2019.

Дисертаційна робота присвячена вирішенню актуального наукового завдання підвищення ефективності перетворення енергії в нелінійних електричних колах зі змінним навантаженням на прикладі електричного кола електроскутера шляхом удосконалення його структури та методу розрахунку параметрів джерела живлення.

Основна частина дисертації складається зі вступу, чотирьох розділів розділених на підрозділи, висновків, списку використаної літератури та додатками зі списком опублікованих праць здобувача за темою дисертації і наукових семінарів та конференцій, на яких доповідались отримані результати, актами впровадження результатів дисертації та іншого.

Розділ 1 дисертаційної роботи присвячений огляду наукових праць за темами, близькими до теми дисертації. Проведений аналіз елементів нелінійного електричного кола зі змінним навантаженням, визначені їхні переваги, недоліки та області застосування.

Визначено, що найбільш широко у якості джерел електрорушійної сили (ЕРС) нелінійних електричних кіл застосовуються літій-іонні акумулятори. Проте вони мають значний внутрішній електричний опір, що знижує їхній коефіцієнт корисної дії (ККД). Це призводить до зростання втрат в усьому електричному колі та зниження його енергоефективності. Електричне коло містить також джерело ЕРС електромеханічного перетворювача, величина якої швидко змінюється при перехідних процесах, обумовлених частими розгонами

та сповільненнями транспортного засобу в умовах міського руху. Це джерело працює як в режимі споживача, так і генератора електроенергії, впливаючи на енергоефективність електричного кола.

Встановлено, що для покращення ефективності нелінійних електричних кіл використовуються різні схеми підключення до акумулятора суперконденсатора, як ефективного накопичувача енергії, що має високу швидкість заряду й розряду, а також велику питому потужність.

Аналіз показав, що існуючі математичні моделі таких нелінійних електричних кіл не враховують повний перелік нелінійностей, не враховують особливості зміни ЕРС перетворювача, містять недостатньо точні математичні моделі акумуляторів в поєднанні з накопичувачами енергії на суперконденсаторах, що не дозволяє дати адекватний висновок про енергоефективність таких кіл.

Аналіз виявлених недоліків свідчить про актуальність завдання з підвищення ефективності перетворення енергії в нелінійних електричних колах зі змінним навантаженням шляхом удосконалення його структури та методу розрахунку параметрів джерела живлення та накопичувача електроенергії на основі аналізу перехідних та усталених процесів.

У розділі 2 дисертаційної роботи розроблена математична та комп'ютерна модель нелінійного електричного кола зі змінним навантаженням, яка відрізняється більшою точністю при визначенні енергоефективності кола за рахунок урахування зміни електрорушійної сили електромеханічного перетворювача та впливу нелінійностей елементів під час перехідних процесів. Модель побудована за результатами аналізу математичних моделей елементів кола та впливу їх параметрів на енергоефективність перетворення енергії.

За основу математичної моделі електромеханічного перетворювача енергії обрано модель асинхронного двигуна в нерухомих ортогональних координатах. Модель двигуна є недостатньо точною, оскільки не враховує втрати в магнітному колі. Для врахування цих втрат модель електричного кола доповнено нелінійним резистором, що підключається паралельно до

перетворювача або до джерела живлення. Параметри нелінійного резистора визначаються на основі значень амплітуди та частоти напруги живлення електродвигуна, від яких залежать магнітні втрати.

Використано математичну модель силового електронного перетворювача електричної енергії (інвертора) з широтно-імпульсною модуляцією та системою заданої амплітуди та положення вектора напруги живлення електродвигуна. Вхідними змінними системи є частота обертання ротора двигуна та величина магнітного потоку.

Проведено дослідження математичної моделі літій-іонного акумулятора, результати якого показали, що вплив більшості нелінійних параметрів проявляється через проміжки часу, які довші за час перехідних процесів. Таким чином визначено, що для спрощення загальної математичної моделі електричного кола можна знехтувати без відчутної втрати точності нелінійностями акумулятора та використовувати у якості його моделі послідовне з'єднання ідеального джерела ЕРС та резистора, величина якого дорівнюватиме внутрішньому опору акумулятора.

Обрана математична модель суперконденсатора з трьома паралельними RC-контурами, один з яких містить нелінійну ємність. Інші два ємнісні контури мають достатньо великі сталі часу, тому суттєво не впливають на перехідні процеси в колі і не ускладнюють загальну математичну модель та не потребують її спрощення.

Досліджено математичну модель перетворювача постійного струму. Для загальної моделі нелінійного електричного кола обрано ускладнену модель перетворювача з урахуванням внутрішніх опорів елементів, оскільки вони мають значний вплив на енергоефективність кола.

У розділі 3 дисертаційної роботи проведено дослідження ефективності перетворення енергії в нелінійному електричному колі зі змінним навантаженням. Результати дослідження дозволили знайти залежність енергоефективності кола від величини ємності суперконденсатора та значення магнітного потоку електродвигуна.

Розраховано параметри та обрано елементи нелінійного електричного кола для дослідження енергоефективності перетворення енергії на прикладі кола електроскутера. В якості автономного джерела живлення використовується батарея літій-іонних акумуляторів із можливістю паралельного підключення батареї суперконденсаторів. Електромеханічним перетворювачем є асинхронний двигун з заданою швидкістю та магнітним потоком.

Розроблено заступну схему нелінійного електричного кола з автономним регульованим електромеханічним перетворювачем, в якій за допомогою нелінійного резистора враховуються магнітні втрати в магнітопроводі перетворювача. Здійснено перевірку розробленої математичної моделі нелінійного електричного кола на експериментальній установці, яка підтвердила її адекватність.

Проведено дослідження на комп'ютерній моделі залежності енергоефективності електричного кола від заданої величини магнітного потоку електромеханічного перетворювача, яке показало, що найбільш ефективним для даного кола є номінальний магнітний потік при зміні величини навантаження. На відміну від відомих стратегій зміни магнітного потоку при зміні навантаження при живленні кола від мережі великої потужності пониження магнітного потоку внаслідок великого електричного опору автономного джерела живлення призводить до зростання втрат енергії.

Досліджено на комп'ютерній моделі залежність енергоефективності нелінійного кола від ємності суперконденсатора, результати якого показали, що існує раціональне значення ємності суперконденсатора, за якого споживання електроенергії є мінімальним. Суперконденсатори з меншою ємністю занадто сильно розряджаються при розгоні електроскутера, що призводить до роботи за пониженої напруги живлення, а значить до зростання втрат. Використання суперконденсаторів з більшою ємністю призводить до суттєвого зростання маси електроскутера, а значить і споживання енергії при розгоні та на подолання сили тертя коліс. Для заданого електричного кола електроскутера

при відпрацюванні європейського міського їздового циклу ємність суперконденсатора, за якої споживання енергії є мінімальним, склала 0,725 Ф. за напруги 370 В. Зменшення споживання електроенергії по відношенню до кола без суперконденсатора становить 3,89 %.

Аналогічно до вищенаведеного було проведено дослідження енергоефективності кола з використанням додаткового вторинного джерела живлення пониженої напруги. Був отриманий аналогічний результат: ємність суперконденсатора, за якої спостерігалось найменше споживання електроенергії, склала 200 Ф за напруги 25,9 В, що забезпечило зменшення споживання енергії на 5,09 %.

У розділі 4 дисертаційної роботи проведено удосконалення методу підвищення ефективності перетворення енергії в нелінійному електричному колі зі змінним навантаженням.

Удосконалена структура джерела живлення в системі акумулятор-суперконденсатор. Система розподілу живлення створює умови для дозаряду суперконденсатора до початкового значення напруги в моменти відсутності навантаження (зупинок електротранспорту). Аналіз показав, що без цієї системи суперконденсатор у періоди відсутності навантаження не встигає дозарядитись до початкового значення і наступний період навантаження починається із заниженим значенням його напруги, що призводить до додаткових втрат енергії. Основною перевагою запропонованої системи є використання існуючих елементів електричного кола, тому її впровадження не вимагатиме додаткових матеріальних витрат.

Проведено дослідження енергоефективності нелінійного електричного кола з удосконаленою системою розподілу живлення. Аналіз результатів дослідження показав, що використання запропонованої системи дозволяє додатково зменшити споживання енергії в електричному колі при відпрацюванні європейського міського їздового циклу на 0,14 %.

Проведено дослідження енергоефективності нелінійного електричного кола з удосконаленою системою розподілу живлення та з використанням

вторинного джерела живлення пониженої напруги. У цьому випадку можливе додаткове зменшення споживання енергії при відпрацюванні міського їздового циклу ще на 0,14 %.

Ключові слова: енергоефективність, змінне навантаження, нелінійне електричне коло, паралельне з'єднання акумулятор-суперконденсатор.

ABSTRACT

Trinchuk D.Y. An increase of the energy conversion efficiency in nonlinear electric circuits with time varying load. – Qualifying scientific work on the right of manuscript.

The thesis submitted in fulfillment of the Candidate of Science (PhD) in Engineering degree on specialty 05.09.05 – «Theoretical Electrical Engineering» (141 Power engineering, electrical engineering and electromechanics). – National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», Kyiv, 2019.

The thesis is devoted to solving the actual scientific problem of increasing the efficiency of energy transformation in nonlinear electric circuits with time varying load by the example of implementing such circuit as an electric scooter power circuit by means of improvement of the structure and method of calculating the parameters of power supply.

The main part of the thesis consists of introduction, four sections divided into subsections, conclusions, references and appendixes with the list of the author's publications and scientific conferences on which the results of the thesis were presented and with the acts of the thesis' results implementation.

The section 1 of the thesis is devoted to the review of the scientific works on the topics referring to the topic of the research. The analysis of the elements of the nonlinear electric circuit with time varying load is concluded, their pros and cons as well as their area of implementation is defined.

It is determined that the most common source of electromotive force (EMF) of nonlinear electric circuits with time varying load is Li-Ion accumulator. However,

they have large impedance which decreases their efficiency. It leads to the increasing of heat losses in the electric circuit and decreases its efficiency as the whole. The circuit also includes EMF source of the electromechanical converter, the magnitude of which changes rapidly during the transients, caused by frequent accelerations and decelerations of the vehicle in a city. This source works as both energy generator and consumer influencing on the circuit's efficiency.

It is concluded that in order to improve the efficiency of the nonlinear electric circuits different designs of supercapacitor connections to the accumulator are used since supercapacitor is the effective energy storage device that has high recharging speed and power density.

Analysis has shown that existing mathematical models of such nonlinear electric circuits do not take into account all the nonlinearities, do not respond to the specialty of changing EMF of the converter, include not accurate enough mathematical models of accumulator-supercapacitor connections, all together obstruct making the adequate conclusion about efficiency of such circuits.

Analysis of disadvantages exhibits the actuality of the problem of increasing the efficiency of nonlinear electric circuits with time varying load by the means of improvement of the structure and the method of calculating the parameters of power supply and energy storage device on the basis of analysis of transients and stable modes.

In the section 2 of the thesis a mathematical and computer model of nonlinear electric circuits with time varying load is developed. This model stands out by being more accurate in the calculating of the circuit efficiency by the means of taking into account electromechanical converter's EMF rapid changes of magnitude and influence of nonlinearities during transients. The model is developed on the results of the analysis of circuit elements' mathematical models and influence of their parameters of the efficiency of energy transformation.

The model of induction motor (IM) in static orthogonal coordinates is chosen as basis for the mathematical model of electromechanical energy converter. The IM model is not accurate enough as it does not consider its magnet losses. In order to

calculate these losses the nonlinear resistor is added to the circuit in-parallel to the converter or power supply on the voltage of the IM. The parameters of this resistor are determined by the magnitude and frequency of the IM supply voltage that influence the magnet losses of the converter.

The mathematical model of the converter of electrical energy (inverter) with space-vector pulse-width modulation (SVPWM) is used. The inputs of the SVPWM are leading signals of IM voltage frequency and magnetic flux magnitude.

The research of mathematic model of Li-Ion accumulator has shown that the influence of the most of nonlinear parameters is considerable only in time periods that exceed the transients in the circuit under consideration. Thus it is concluded that in order to simplify the mathematical model of the circuit the accumulator nonlinearities can be neglected without decreasing in accuracy. The serial connection of an ideal source of EMF and a resistor can be used as adequate model of the accumulator for this research.

The model of supercapacitor with three parallel RC-circuits with a nonlinear capacitance in one of them is chosen for the research. The two of the linear RC-circuits have big time constants and therefore do not have large impact on the processes in the circuit. On the other hand being linear they do not increase the difficulty of the model so there is no need in neglecting them either.

The mathematical model of inverter is examined. The complicated model of the inverter that considers the significant impedances of the elements is chosen for the model of the circuit.

In the section 3 of the thesis the research of the efficiency of energy transformation in nonlinear electric circuits with independent controllable power supply is concluded. The results of the research helped to find the relation between the circuit efficiency and the capacitance of the supercapacitor as well as the magnetic flux magnitude.

The parameters of the elements of the nonlinear circuit are computed in order to examine the efficiency of energy transformation on the example of electric scooter circuit. Li-Ion battery is used as power supply with the possibility for connecting the

supercapacitor battery in-parallel to it. Induction motor driven by the SVPWM is implemented as the independent controllable electromechanical converter.

Equivalent circuit of the nonlinear electric circuit with independent controllable electromechanical energy converter is designed. It considers the magnetic losses of the electromechanical converter with the help of nonlinear resistor. The designed equivalent circuit is verified on the experimental setup.

The research of the dependence of the efficiency of the circuit on the electromechanical converter magnetic flux SVPWM input is concluded. It has shown that the most effective mode for the given circuit is working on the rated magnetic flux on any load. It differs from the known strategies of changing the magnetic flux with the load when the electric circuits are supplied by the high power grid: in the given circuit the decreasing of the magnetic flux leads to the increasing of the heat losses on the large power supply impedance.

The dependence of the electric circuit efficiency on the supercapacitor capacitance is researched. The results has exhibited that the rational value of the supercapacitor capacitance exists with which the energy consumption in the circuit is the lowest. Supercapacitors with lesser capacitance discharge too fast during the acceleration of the electric scooter which leads to the decreasing of the voltage on the IM and thus to the increasing of heat losses. Implementing the supercapacitor with higher capacitance results in significant increasing of the electric scooter mass and thus to increasing of energy consumption during accelerations and for the overcoming of the weal friction. For the given electric scooter circuit on the European urban driving cycle load the supercapacitor rational capacitance with the lowest energy consumption is 0.725 F on the voltage of 370 V. The decreasing of the energy consumption in comparison to the circuit without supercapacitor is 3.89 %.

The research of the circuit efficiency with the usage of additional secondary power supply of lowered voltage is conducted in the same way. The result is similar: the supercapacitor capacitance for the lowest energy consumption is 200 F on the voltage of 25.9 V, which resulted in the energy economy of 5.09 %.

In the section 4 of the thesis the improvement of the method of the increasing of the energy transformation in nonlinear electric circuits with time varying load is provided.

The structure of the power supply in accumulator-supercapacitor system is modernized. The power distribution system creates the possibilities for the supercapacitor recharging to its maximum voltage in the periods of zero loads (vehicle stops). Analysis has underlined that without this system supercapacitor does not make the recharging in time before the new load applies and the following transient of the acceleration starts with the lowered voltage which creates additional energy losses. The main advantage of the proposed system is the usage of already implemented elements of the electric circuit which means there is no need of additional financial expenses.

The research of the efficiency of the nonlinear circuit with the modernized power distribution system is conducted. Analysis has shown that implementing of this system makes it possible to decrease the energy consumption by additional 0.14 %.

The research of the efficiency of the nonlinear circuit with the modernized power distribution system for lowered voltage of power supply is conducted. In this case implementing of this system decreases the energy consumption by additional 0.14 %.

Keywords: accumulator-supercapacitor in-parallel connection, energy efficiency, nonlinear electric circuit, time varying load.

Список публікацій здобувача:

1. Островерхов М. Я., Реуцький М. О., Трінчук Д. Я. Дослідження енергоефективності нелінійного електричного кола з автономним живленням на прикладі привода скутера // Вісник національного технічного університету «ХПІ». Серія «Механіко-технологічні системи та комплекси». – Харків: НТУ «ХПІ», 2016. – Вип. 4(1176). – С. 109-115.

2. Островерхов М. Я., Реуцький М. О., Трінчук Д. Я. Ефективність перетворення енергії в нелінійному електричному колі електроскутера, що працює на міський їздовий цикл // Вісник національного технічного університету «ХПІ». – Харків: НТУ «ХПІ», 2017. – Вип. 27(1249). – С. 249-253.

3. Островерхов М. Я., Реуцький М. О., Трінчук Д. Я. Дослідження ефективності перетворення енергії в приводі електроскутера в залежності від системи живлення та навантаження // Енергетика: економіка, технології, екологія. – 2017. - №3. – С. 51-55.

4. Ostroverkhov M., Trinchuk D. Study into Energy Efficiency of the Drive of Electric Vehicles with an Independent Power Supply Depending on the Configuration of the Power Source // Technology Audit and Production Reserves. – 2018. – № 4/1 (42). – P. 45-50. (*Index Copernicus*).

5. Ostroverkhov M., Reutskyi M., Trinchuk D. Study of the Induction Motor Electric Drive Efficiency in Transients during their Acceleration // Technology Audit and Production Reserves. – 2018. – № 5/1 (43). – P. 23-27. (*Index Copernicus*).

6. Островерхов М. Я., Трінчук Д. Я. Дослідження енергоефективності приводу електричних транспортних засобів з автономним живленням із суперконденсатором з використанням перетворювача постійного струму // Електротехнічні та комп'ютерні системи. – Одеса, 2018. – Вип. 29(105). – с. 58-65.

7. Ostroverkhov M., Trinchuk D. The Mathematical Model of a Nonlinear Electrical Circuit with an Independent Controllable Electromechanical Energy Converter // Technology Audit and Production Reserves. – 2019. – № 1/1 (45). – P. 39-43. (*Index Copernicus*).

Тези доповідей на наукових конференціях:

8. Trinchuk D. Analysis of the Efficiency of Energy Transformation in Induction Motor Electric Drives with Independent Power Supply. // IEEE International young scientists forum on applied physics and engineering. – Lviv, 2017. – P. 24-27.

9. Островерхов М.Я., Реуцький М.О., Трінчук Д.Я. Дослідження робочих режимів нелінійного електричного кола з автономним джерелом живлення в транспортних установках на прикладі привода електроскутера // Проблеми енергоресурсозбереження в електротехнічних системах. – Кременчук: КрНУ, 2016. – Вип. 1/2016 (4). – С. 75–77.

10. Реуцький М.О., Трінчук Д.Я., Дешко А.О. Застосування суперконденсаторів у приводі електромобіля на базі двигуна постійного струму з незалежним збудженням // Міжнародна науково-технічна конференція молодих учених, аспірантів, студентів. Сучасні проблеми електроенерготехніки та автоматики – Київ, 2014.

11. Реуцький М.О., Шинкаренко В.Ф., Дешко А.О. Трінчук Д.Я. Електромеханічний комплекс для дослідження машин постійного струму // Міжнародна науково-технічна конференція молодих учених, аспірантів, студентів. Сучасні проблеми електроенерготехніки та автоматики – Київ, 2014.

12. Островерхов М.Я., Реуцький М.О., Трінчук Д.Я. Використання Комп'ютерного моделювання для дослідження робочих режимів нелінійного електричного кола з автономним джерелом живлення на прикладі електроскутера // Шоста міжнародна науково-технічна конференція. Моделювання в електротехніці і світлотехніці. – Київ, 2016.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	16
РОЗДІЛ 1. Аналіз методів підвищення ефективності перетворення енергії в нелінійних електричних колах.....	22
1.1 Аналіз властивостей та енергетичних показників елементів електричного кола.....	22
1.1.1 Ефективність акумуляторів як джерел живлення електричних кіл.....	22
1.1.2 Суперконденсатор як особливий вид накопичувача енергії електричного кола.....	31
1.1.3 Аналіз властивостей та показників електромеханічних перетворювачів енергії.....	33
1.1.4 Силовий електронний перетворювач як регулятор потоку енергії електричного кола.....	44
1.2 Аналіз досліджень з покращення енергоефективності нелінійних електричних кіл.....	45
1.3 Постановка задач дослідження.....	50
РОЗДІЛ 2. Математична модель нелінійного електричного кола зі змінним навантаженням.....	53
2.1 Математичний опис нелінійного елемента кола – електромеханічного перетворювача енергії.....	53
2.1.1 Математична модель електромеханічного перетворювача енергії в природних координатах.....	54
2.1.2 Динамічна модель електромеханічного перетворювача енергії на базі ортогональних координат з використання перетворення Парка.....	61
2.1.3 Динамічна модель електромеханічного перетворювача енергії на базі рівнянь Крона.....	69
2.1.4 Динамічна модель електромеханічного перетворювача енергії на базі рівнянь Стенлі.....	73

2.2 Математична модель силового електронного перетворювача електричної енергії – широтно-імпульсного модулятора.....	74
2.3 Математична модель джерела живлення – літій-іонного акумулятора	80
2.4 Математична модель суперконденсатора.....	84
2.5 Математична модель перетворювача енергії постійного струму	85
2.6 Комп'ютерна модель нелінійного електричного кола зі змінним навантаженням	90
2.7 Висновки до розділу	93
РОЗДІЛ 3. Дослідження ефективності перетворення енергії в нелінійному електричному колі зі змінним навантаженням	95
3.1 Вибір та розрахунок параметрів елементів нелінійного електричного кола.....	95
3.2 Схеми нелінійного електричного кола з регульованим електромеханічним перетворювачем.....	104
3.3 Експериментальне дослідження елементів нелінійного електричного кола	108
3.4 Дослідження енергоефективності нелінійного електричного кола на комп'ютерній моделі	118
3.4.1 Дослідження залежності енергоефективності кола від режиму роботи електромеханічного перетворювача	118
3.4.2 Дослідження залежності енергоефективності кола від ємності суперконденсатора.....	123
3.4.3 Дослідження залежності енергоефективності кола з перетворювачем постійного струму від ємності суперконденсатора.....	132
3.5 Висновки до розділу	143
РОЗДІЛ 4. Удосконалення методів з підвищення ефективності перетворення енергії в нелінійному електричному колі зі змінним навантаженням.....	145

4.1 Удосконалення структури джерела живлення електричного кола на основі системи акумулятор-суперконденсатор.....	145
4.2 Аналіз енергоефективності електричного кола електроскутера при відпрацюванні міського їздового циклу з використанням системи дозаряду суперконденсатора.....	153
4.3 Аналіз енергоефективності електричного кола електроскутера при відпрацюванні міського їздового циклу з використанням системи дозаряду суперконденсатора та при застосуванні джерела пониженої напруги	159
4.4 Висновок до розділу	165
ВИСНОВКИ.....	167
Список використаних джерел	171
ДОДАТОК А. Список публікацій за темою дисертації та відомості про апробацію результатів дисертації.....	184
ДОДАТОК Б. Перевірочний розрахунок параметрів асинхронного двигуна для визначення параметрів його заступної схеми.....	187
ДОДАТОК В. Акти впровадження результатів дисертаційної роботи	214

ВСТУП

Актуальність теми. Нелінійні електричні кола зі змінним навантаженням широко використовуються в автономних електричних транспортних засобах, зокрема, в електромобілях, електробусах, електроскутерах, гіроскутерах, сігвеях, електробайках. Основними фізичними елементами силового електричного кола, що складають основу роботи цих транспортних засобів, є акумуляторна батарея, накопичувач електроенергії на суперконденсаторах, силовий електронний перетворювач та електродвигун. Еквівалентна заступна схема такого електричного кола є складною і складається з котушок індуктивностей, що враховують енергію магнітного поля, конденсаторів, що враховують енергію електричного поля, резисторів, що враховують перетворення електричної енергії у інші види енергії, джерел ЕРС. Окремі елементи еквівалентних схем реальних складових електричного кола вміщують нелінійні індуктивності, конденсатори та резистори. Тому дослідження процесів ефективного перетворення енергії в таких нелінійних електричних колах є однією з важливих задач теоретичної електротехніки.

Значний внесок у розвиток теорії перетворення енергії в електричних колах для створення нових та вдосконалення існуючих електротехнічних пристроїв і систем внесли такі відомі вчені як Шидловський А.К., Щерба А.А., Павлов В.Б., Попов А.В., Шембель О.М., Білогуров В.А. Москатов Є. А., Ткачук В.І., Фейзі Т., Квіцьєн М., Сінг А., Ренхарт В., Магеле К., Піторач К., Буттербах С., Еррера В.І., Гастаньяга Х., Жи Янг, Ю Жанг та інші.

Особливістю режиму роботи електричного кола електротранспортних засобів в умовах міського руху є суттєва кількість перехідних процесів, що обумовлює динамічну зміну навантаження та збільшення втрат енергії в електричному колі. Ще однією характерною особливістю є наявність в електричному колі додаткової ЕРС електродвигуна, величина та напрямок якої змінюється, суттєво впливаючи на процеси заряду-розряду акумулятора, суперконденсатора та ефективність процесу перетворення енергії. Питання

підвищення ефективності перетворення енергії в таких нелінійних електричних колах потребує подальшого дослідження з урахуванням впливу перехідних процесів на роботу джерела живлення та накопичувача електроенергії.

Таким чином, підвищення ефективності перетворення енергії в нелінійних електричних колах зі змінним навантаженням шляхом удосконалення його структури та методу розрахунку параметрів джерела живлення та накопичувача електроенергії на основі аналізу енергетичних процесів є актуальним та важливим науковим завданням.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота виконана в рамках пріоритетного напрямку «Енергетика та енергоефективність» в ході виконання на кафедрі теоретичної електротехніки державної бюджетної науково-дослідної теми «Методи та засоби структурно-параметричної ідентифікації електротехнічних систем технологічної лінії з виробництва вітчизняного кабелю з полімерною ізоляцією на надвисокі напруги» (ДР № 0116U003716) за планом науково-дослідних робіт Міністерства освіти і науки України та ініціативної науково-дослідної теми «Методи керування взаємозв'язаними електротехнічними і електромеханічними системами в умовах невизначеності математичної моделі об'єкту» (ДР № 0118U000536). У вказаних роботах автор був виконавцем наукових досліджень з підвищення ефективності перетворення енергії в нелінійних електричних колах електротехнічних та електромеханічних систем.

Мета роботи і задачі дослідження – підвищення ефективності перетворення енергії в нелінійних електричних колах зі змінним навантаженням шляхом удосконалення їх структури та методу розрахунку параметрів джерела живлення та накопичувача електроенергії на основі аналізу енергетичних процесів.

Для досягнення мети поставлені наступні **основні задачі**:

1. Аналіз методів підвищення ефективності перетворення енергії в нелінійних електричних колах.

2. Розробка математичної моделі нелінійного електричного кола зі змінним навантаженням.

3. Дослідження ефективності перетворення енергії в нелінійному електричному колі зі змінним навантаженням.

4. Удосконалення методу підвищення ефективності перетворення енергії в нелінійному електричному колі зі змінним навантаженням.

Об'єктом дослідження є процеси перетворення енергії в нелінійних електричних колах зі змінним навантаженням.

Предметом дослідження є ефективність перетворення енергії в нелінійних електричних колах зі змінним навантаженням.

Методи дослідження. Вирішення сформульованих у дисертаційній роботі задач досягнуто з використанням теорії лінійних та нелінійних електричних кіл, вирішенням нелінійних диференціальних рівнянь високого порядку методом чисельного розрахунку, методів фізичного та комп'ютерного моделювання. Достовірність отриманих у роботі результатів забезпечується експериментальною перевіркою створених у роботі комп'ютерних моделей.

Наукова новизна одержаних результатів.

1. Отримала розвиток теорія нелінійних електричних кіл в частині удосконалення математичної моделі нелінійного електричного кола зі змінним навантаженням шляхом врахування ступеню впливу параметрів елементів кола на процеси перетворення енергії, що дозволяє досліджувати ефективність перетворення енергії при компромісі між точністю розрахунків та складністю моделі.

2. Отримав подальший розвиток метод аналізу енергоефективності нелінійного електричного кола зі змінним навантаженням на основі математичної моделі, яка враховує зміну електрорушійної сили електродвигуна, що дозволяє підвищити точність розрахунку енергоефективності під час перехідних процесів.

3. Отримав подальший розвиток метод розрахунку ємності суперконденсатора підключеного паралельно до акумулятора джерела

живлення нелінійного електричного кола зі змінним навантаженням, який забезпечує мінімальне споживання електричної енергії та підвищення енергоефективності кола.

4. Удосконалено електричне коло джерела живлення, в якому за рахунок секційної системи дозаряду суперконденсатора від акумулятора під час пауз навантаження зменшується час перехідного процесу дозаряду, що дозволяє зменшити середньо квадратичне відхилення струму, електричні втрати в колі та споживання електричної енергії в нелінійному електричному колі зі змінним навантаженням.

Практичне значення одержаних результатів для автономних електричних транспортних засобах полягає у розробці методики вибору структури та розрахунку параметрів джерела живлення та накопичувача електроенергії нелінійного електричного кола, впровадження якої забезпечує покращення їхньої економічності.

Розроблена та експериментально перевірена математична модель нелінійного електричного кола зі змінним навантаженням дозволяє здійснювати аналіз енергоефективності електричних транспортних засобів з автономним живленням: електромобілі, електроскутери, електробуси, гіроскутери, сігвеї тощо.

Створена методика з розрахунку ємності суперконденсатора, що підключається паралельно до акумулятора, яка забезпечує мінімізацію споживання енергії електричним колом та дозволяє розробляти більш енергоефективні електричні транспортні засоби з автономним електроживленням (можливе зменшення до 5,1% споживання енергії при відпрацюванні Європейського міського їздового циклу).

Удосконалена структура джерела живлення на основі дозаряду суперконденсатора під час пауз навантаження дозволяє підвищити енергоефективність нелінійних електричних кіл, зменшивши споживання енергії (додаткова економія енергії складає близько 0,14 %). Основною перевагою запропонованого рішення є використання існуючих елементів

електричного кола, тому її впровадження не вимагатиме додаткових матеріальних витрат. Параметри удосконаленого електричного кола автономного джерела живлення можуть бути персоналізовано під кожного користувача – водія транспортного засобу – базуючись на тривалості пауз руху, мінімізуючи споживання енергії в конкретних умовах.

Використання методики розрахунку ємності суперконденсатора та удосконаленої системи керування джерелом живлення забезпечує зменшення максимальних ударних струмів через акумулятор, що підвищує надійність роботи електричного кола та збільшує тривалість експлуатації акумуляторної батареї.

Результати виконаних досліджень впроваджено в міжнародній компанії «DelFast» з супероперативної кур'єрської доставки на електробайках, ДП НДІ «Квант» (м. Київ) та в навчальний процес кафедри теоретичної електротехніки КПІ ім. Ігоря Сікорського.

Особистий внесок. Наукові положення та результати, що представлені в дисертації, отримані здобувачем особисто. Створення математичної моделі, проведення досліджень, отримання та аналіз результатів було виконано автором самостійно. Також здобувачеві належить ідея з підвищення енергоефективності кола, що викладена в четвертому розділі. У співавторстві з науковим керівником сформульовані мета і завдання досліджень, висновки. У публікаціях, написаних у співавторстві, здобувачеві належить формулювання завдань, описи об'єкта досліджень, аналіз публікацій, отримання та оформлення результатів моделювання та розрахунків.

Апробація результатів дисертації. Основні положення і результати досліджень за темою дисертаційної роботи докладалися, обговорювалися і отримали схвальні відгуки на Міжнародних науково-технічних конференціях: «IEEE International Young Scientists Forum on Applied Physics and Engineering» (Lviv, 2017); «Відновлювана енергетика та енергоефективність у XXI столітті» (м. Київ, 2017); «Проблеми енергоресурсозбереження в електротехнічних системах. Наука, освіта і практика» (м. Кременчук, 2016); «Моделювання в

електротехніці, електроніці і світлотехніці» (м. Київ, 2016); «Сучасні проблеми електроенерготехніки та автоматики» (м. Київ, 2014).

Публікації. За результатами досліджень опубліковано 12 наукових праць, у тому числі 7 статей у наукових фахових виданнях (з них 3 статті у виданнях України, що входять до міжнародних наукометричних баз даних), 5 тез доповідей в збірниках матеріалів конференцій.

Структура та обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел (121 найменування) і трьох додатків. Основний зміст викладений на 155 сторінках друкованого тексту, містить 11 таблиць, 73 рисунки. Загальний обсяг дисертації – 217 сторінок.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ МЕТОДІВ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ПЕРЕТВОРЕННЯ ЕНЕРГІЇ В НЕЛІНІЙНИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ КОЛАХ

Підвищення ефективності перетворення енергії в нелінійних електричних колах є актуальною задачею, що підтверджують дослідження провідних вчених в цьому напрямку з усього світу. Загалом, для підвищення енергоефективності електричного кола застосовується два підходи: підвищення ефективності перетворення енергії кожним елементом кола чи покращення ефективності взаємозв'язків між цими елементами. У розділі проведено огляд досліджень, спрямованих у першому напрямку, задля вибору найбільш ефективних та поширених елементів кола, а потім проаналізовано дослідження у другому напрямку для виявлення шляхів досягнення мети дисертації.

1.1 Аналіз властивостей та енергетичних показників елементів електричного кола

1.1.1 Ефективність акумуляторів як джерел живлення електричних кіл

Основним джерелом живлення в електричних колах з автономним живленням є акумулятори або акумуляторні батареї. Електричний акумулятор – хімічне джерело електричного струму багаторазової дії, основна специфіка якого полягає в зворотності внутрішніх хімічних процесів, що забезпечує його багаторазове циклічне використання (через заряд-розряд) для накопичення електричної енергії та автономного електроживлення різноманітних електротехнічних пристроїв та систем. Електричний акумулятор належить до категорії первинних хімічних джерел струму. Принцип дії акумулятора заснований на зворотності хімічної реакції. Найпоширеніші електричні (кислотні та лужні) акумулятори накопичують хімічну енергію (внаслідок зворотних хімічних реакцій між речовиною електродів та електролітом) і

віддають електричну енергію, являючи собою гальванічні елементи. Працездатність акумулятора може бути відновлена шляхом заряду, тобто пропусканням електричного струму в напрямку, зворотному напрямку струму при розряді: на від'ємному електроді (катоді) реакція окислення замінюється реакцією відновлення, а на позитивному електроді (аноді) реакція відновлення змінюється на реакцію окислення [71].

Характеристики акумулятора:

Електрична ємність – це максимально можливий корисний заряд, що віддається повністю зарядженим акумулятором при розряді до найменшої допустимої напруги. В міжнародній системі одиниць СІ ємність акумуляторів вимірюють в кулонах. На практиці використовується позасистемна одиниця Ампер-година: $1 \text{ А} \cdot \text{год} = 3600 \text{ Кл}$.

Енергетична ємність — енергія, що віддається повністю зарядженим акумулятором при розряді до найменшої допустимої напруги. В системі СІ енергетична ємність вимірюється в джоулях. На практиці використовується позасистемна одиниця Ват-година: $1 \text{ Вт} \cdot \text{год} = 3600 \text{ Дж}$ [120].

На теперішній час існує багато різних видів акумуляторів, що відрізняються хімічними властивостями, електротехнічними параметрами, кожен з яких має свої переваги й недоліки.

Розрізняють кислотні (свинцеві) та лужні акумулятори.

Кислотні акумулятори мають високу номінальну напругу (2 В), малий внутрішній електричний опір та відносно високий коефіцієнт корисної дії (до 0,85). Проте невеликий термін служби, недостатня міцність та незадовільна робота при низьких і високих температурах обмежують їх застосування.

Лужні акумулятори мають ряд переваг перед кислотними: вони міцніші, стійкі до перевантажень, добре працюють в широкому інтервалі температур, невимогливі до виробничих умов. Основні їх недоліки: низький ККД (до 60 %) і низька номінальна напруга (1,2; 1,25; 1,33 В).

За складом електродів (активної маси) лужні акумулятори поділяють на:

- кадмій-нікелеві;

- залізо-нікелеві;
- цинк-нікелеві;
- срібло-цинкові.

За способом утримання електродів акумулятори поділяють на:

- ламельні (у них активна маса поміщена у ламелі. У залізо-нікелевих акумуляторах ламелями є плоскі сталеві коробочки з перфорованими стінками);
- безламельні: мають підвищену ємність і менші розміри.

Останнім часом почали застосовувати стартерні залізо-нікельові акумулятори, які працюють при низьких температурах краще, ніж кислотні. Для одержання великих імпульсних струмів при низьких і високих температурах та значних змінах атмосферного тиску застосовують срібло-цинкові акумулятори.

Кадмій-нікельові акумулятори можуть бути дуже малих розмірів – 1-3 см², їх застосовують у слухових апаратах для глухих та в напівпровідникових радіоприладах.

Енергоефективність акумуляторів визначається тепловими втратами на активному внутрішньому опорі елементів. В залежності від будови, цей активний опір може різнитися на великі величини і для покращення енергоефективності варто вибирати акумулятори, які при тих же самих значеннях номінальної напруги, струму та накопиченому зарядові матимуть менший внутрішній опір.

Розглянемо деякі найбільш розповсюджені види акумуляторів та оцінимо їхні переваги та недоліки.

Свинцево-кислотний акумулятор – електричний акумулятор, принцип роботи якого заснований на електрохімічних реакціях свинцю та діоксиду свинцю в кислому сірчаному середовищі. Його було винайдено в 1859 році французьким фізиком Гастоном Планте, що робить його найстарішим типом акумулятора. Характерні показники свинцево-кислотних акумуляторів:

- теоретично можлива максимальна енергоемність: 133 Вт·год/кг;

- питома енергоємність: 30-60 Вт·год/кг;
- теоретична щільність енергії: 1250 Вт·год/дм³;
- електрорушійна сила (ЕРС) зарядженого акумулятора: 2,11-2,17 В;
- електрорушійна сила розрядженого акумулятора: 1,7 - 1,8 В;
- ККД: до 80 %;
- термін служби (кількість циклів заряд-розряд): 300 - 800;
- саморозряд на добу: 1 – 2 %.

Хоча свинцево-кислотний акумулятор може мати найвищу ємність при температурах понад 30 °С, але тривала експлуатація при таких умовах скорочує його функціональність [120].

До переваг свинцево-кислотних акумуляторів відносяться:

- довговічність;
- невелика вартість;
- надійність;
- низький внутрішній опір;
- високий ККД;
- відсутність ефекту "пам'яті".

До недоліків:

- велика маса;
- використання отруйних речовин;
- неможливість розряду акумулятора при температурі нижче -40 °С і заряду при 0 °С;
- неможливість зберігання пристрою в розрядженому стані;
- значний саморозряд, що досягає 1 % протягом 24 годин [95].

Завдяки своєму низькому внутрішньому опоріві, а значить великих пускових струмах та питомій потужності, свинцево-кислотні акумулятори отримали широке розповсюдження для живлення електрообладнання транспортних засобів в якості стартерних автомобільних батарей, для живлення переносної радіо- і телефонної апаратури; в якості тягових батарей (EVB) глибокого заряду-розряду в електричних транспортних засобах, в тому числі

для транспортування в видобувних шахтах, мікро-гібридних транспортних засобах; для живлення стаціонарних приладів, ДБЖ, для акумулювання енергії з фотовольтаїчних сонячних панелей [11, 25, 27, 50, 58].

Загалом у пасажирських і комерційних автомобілях використовуються батареї напругою 12 вольт постійного струму, в той час як у вантажівках та автобусах, як правило, 24 вольт.

Цей вид акумуляторів є найбільш розповсюдженим у світі. Частка продажів свинцево-кислотних акумуляторів сягає приблизно 40-45 % від всіх продажів акумуляторів [29].

Однак, низький питомий заряд (що означає, що на одиницю накопиченої енергії необхідна більша маса акумуляторної батареї, ніж в інших видах) сильно обмежує застосування свинцево-кислотних акумуляторів в якості джерела живлення для споживачів з тривалим робочим режимом.

Нікель-кадмієвий акумулятор має анод з металічного кадмію Cd (у вигляді порошку), електроліт – гідроксид калію КОН з додаванням гідроксиду літію LiOH (для утворення нікелатів літію і збільшення ємності на 21-25%), катод – гідрат окису нікелю NiOOH з графітовим порошком (близько 5-8%) [120].

Характеристики:

- теоретично можлива енергоємність: 237 Вт·год/кг;
- питома енергоємність: 45 - 65 Вт·год/кг;
- питома щільність енергії: 50 - 150 Вт·год/дм³;
- питома потужність: 150-500 Вт/кг;
- ЕРС: 1,37 В;
- робоча напруга: 1,35 - 1,0 В;
- термін служби: біля 100-900 циклів заряду/розряду;
- саморозряд: 10% в місяць;
- робоча температура: -50...+40 °C [34].

Переваги:

- адекватні масогабаритні показники;
- жорстка кулон-вольтна характеристика;
- довговічність (сучасні промислові нікель-кадмієві акумулятори можуть служити до 20-25 років);
- стійкість до несприятливих умов [61];
- стійкість до високих струмів розряду;
- нікель-кадмієві акумулятори – єдині, які можна зберігати у повністю розрядженому стані.

Недоліки:

- доволі високий внутрішній опір;
- наявність ефекту пам'яті;
- висока токсичність речовин [120].

Незважаючи на свої високі показники, сучасні екологічні вимоги дуже обмежують використання токсичних нікель-кадмієвих акумуляторів. Проте, за рахунок своєї унікальної серед акумуляторних батарей надійності вони є незамінними в електричних колах, що працюють в несприятливих умовах або в системах, що потребують підвищеної надійності. Таким чином основними областями застосування нікель-кадмієвих акумуляторів є бортові комп'ютери кораблів, літаків, ліхтарі для дайвінгу, військова техніка.

Нікель-метал-гідридний акумулятор – електричний акумулятор, у якому позитивним електродом є окисно-нікелевий електрод, а негативним – електрод зі сплавів нікелю з металами рідкоземельної групи, здатних до адсорбції водню і десорбції його при зміні полярності.

На відміну від нікель-кадмієвого акумулятора, в якому негативним електродом є кадмієвий електрод, нікель-метал-гідридні акумулятори мають вищі енергетичні характеристики, однак у них вузький температурний діапазон експлуатації і до того ж вони мають трохи більший саморозряд і більш чутливі до перегріву, що призводить до необхідності вбудовування в батареї елементів захисту.

Вартість однієї А/год нікель-метал-гідридних акумуляторів на 30-50 % вища, ніж у нікель-кадмієвих. NiMH акумулятори можуть мати ємність в 2-3 рази більшу від NiCd, а їхня питома енергія наближується до питомої енергії літій-іонних акумуляторів [120].

Характеристики:

- теоретична енергоємність: 300 Вт·год/кг;
- питома енергоємність: коло 60-72 Вт·год/кг;
- питома щільність енергії: коло 150 Вт·год/дм³;
- ЕРС: 1,25 В;
- робоча напруга: 0,9-1,2 В;
- робоча температура: -60...+55 °С;
- термін служби: коло 300-1000 циклів заряду/розряду;
- саморозряд: до 100 % за рік.

Переваги:

- довговічність;
- низький внутрішній опір;
- непогані масогабаритні показники;
- висока питома потужність;
- стійкість до високих струмів розряду;
- стійкість до низьких температур;
- практично відсутній ефект пам'яті;
- екологічно чисті.

Недоліки:

- залежність ефективності від робочого струму;
- високий саморозряд;
- висока ціна.

Область застосування нікель-метал-гідридних акумуляторів загалом відповідає області застосування свинцево-кислотних, зокрема їм часто надають вибір в радіотехніці, також використовують в гібридних електромобілях. Нікель-метал-гідридні акумулятори виграють майже за всіма

характеристиками, але є суттєво дорожчими. Цей тип батареї особливо популярний для використання в цифрових камерах, тому що вони можуть витримувати високі навантаження і при цьому забезпечити гарну на відміну від звичайних лужних батарей продуктивність. Але, хоча їхня частка на ринку акумуляторних батарей показує зростаючу динаміку, свинцево-кислотні акумулятори все ще залишаються більш популярними. Частка нікель-метал-гідридних акумуляторів на ринку складала лише 3% [16, 26, 44, 51].

Нікель-цинковий акумулятор – це хімічне джерело струму, в якому анодом є цинк, електролітом – гідроксид калію з добавкою гідроксиду літію, а катодом – оксид нікелю.

Характеристики:

- питома енергоємність: коло 60 Вт·год/кг;
- питома щільність енергії: до 255 Вт·го/дм³;
- ЕРС: 1,78 В;
- термін служби: коло 250-370 циклів заряд-розряд;
- Робоча температура: -30...+40 °С.

Переваги:

- велика напруга елемента;
- непогані масогабаритні показники;
- малий внутрішній опір;
- висока питома потужність;
- екологічно чисті.

Недоліки:

- малий термін служби.

Використання нікель-цинкових акумуляторів сильно обмежено по суті єдиним недоліком – дуже малим терміном служби. Тим не менше, їм віддають перевагу в системах, де при обмеженій масі чи просторі необхідно отримати вищу напругу живлення. Прикладом служать цифрові фотоапарати [90].

Літій-іонний акумулятор – один з двох основних типів літієвих електричних акумуляторів, який різниться з літій-полімерним акумулятором

лише типом електроліту, що використовується при їх виготовленні. Широко розповсюджений в побутовій електроніці. Назву літій-іонні акумулятори одержали через те, що електричний струм в зовнішньому колі з'являється через перенос літієвих іонів від анода до катода на основі різних сполук.

Хімічний склад, експлуатаційні характеристики, вартість та безпечність акумуляторів розрізняється за типами літій-іонних акумуляторів. Найбільш поширеними у малопотужній електроніці є акумулятори з катодом на оксиді кобальту (LiCoO_2), що мають високу енергетичну густину, але мають недоліки з точки зору безпеки експлуатації, особливо при їх пошкодженні. Літій-ферум-фосфатні, літій-манган-оксидні та літій-нікель-манган-кобальт-оксидні акумулятори, що теж названі за типом катода, пропонують нижчі рівні питомої енергії, але мають довший життєвий цикл та безпечніші з хімічної точки зору. Такі акумулятори широко застосовуються в електроінструментах, медичному обладнанні та ін. Літій-нікель-манган-кобальт-оксид, зокрема, є лідером за використанням у автомобільній промисловості. Нові літій-сульфурні акумулятори обіцяють найкращі масогабаритні характеристики [66].

Характеристики:

- питома енергоємність: 110-200 Вт·год /кг;
- внутрішній опір: 5-15 мОм/А·год
- питома потужність: 0,3-1,5 кВт/кг
- число циклів заряд/розряд до втрати 20 % місткості: 500 - 1000;
- час швидкого заряду: 2-4 години;
- допустимий перезаряд: дуже низький;
- саморозряд при кімнатній температурі: 7 % в рік;
- напруга максимальна в елементі: 4,18 - 4,20 В (повністю заряджений);
- напруга мінімальна: 2,5 - 2,75 В (повністю розряджений);
- діапазон робочих температур: -20 ... +60 °С.

Переваги:

- дуже висока енергоємність;
- дуже хороші масогабаритні показники;

- дуже низький саморозряд;
- висока напруга елемента;
- стійкість до високих температур.

Недоліки:

- високий внутрішній опір;
- вразливість до високих струмів;
- тривалий час зарядки;
- відносно невисока питома потужність.

Найкращі енергетичні та масогабаритні показники серед акумуляторів призвели до широкого розповсюдження літій-іонних батарей. Вони значно випереджають за питомою енергоємністю всі вищезгадані види акумуляторів. Також вони мають адекватну тривалість роботи та надійність і стійкість до температурних режимів. Хоч вони і не є повністю екологічно чистими, зате кількість токсичних матеріалів мала (порівняно з тими ж нікель-кадмієвими акумуляторами). Зводячи всі ці дані, при виборі акумуляторної батареї як для силової техніки так і для портативної електроніки з тривалим режимом роботи (електричні транспортні засоби, промислові накопичувачі енергії, сонячні електростанції, мобільні електронні пристрої, автономні електричні інструменти тощо) все зводиться до літій-іонних акумуляторів. Попри це, у цього виду акумуляторів залишається ряд недоліків (корінним з яких є великий внутрішній опір), для боротьби з якими доводиться шукати різні електросхематичні рішення [3, 6, 46, 56, 62, 77].

1.1.2 Суперконденсатор як особливий вид накопичувача енергії електричного кола

Особливим видом накопичувача енергії є суперконденсатор. Суперконденсатор (іоністор, ультраконденсатор) – конденсатор з обмеженим або необмеженим електролітом, «обкладинками» в якому служить подвійний електричний шар на межі розділу електрода і електроліту.

У зв'язку з тим, що товщина подвійного електричного шару (тобто відстань між «обкладинками» конденсатора) дуже мала, запасена іоністором енергія вища в порівнянні зі звичайними конденсаторами того ж розміру. До того ж, використання подвійного електричного шару замість звичайного діелектрика дозволяє набагато збільшити площу поверхні електрода (наприклад, шляхом використання пористих матеріалів, таких, як активоване вугілля або спінені метали). Питома ємність суперконденсатора сягає десятки фарад/куб. см, при номінальній напрузі 2-4 вольт.

Надзвичайно велика як для конденсатора ємність дозволяє розглядати деякими вченими суперконденсатор в якості джерела живлення, а не пасивного елементу схеми. З точки зору джерела живлення в залежності від марки суперконденсатор має наступні характеристики:

- питома енергоємність: 1,5-15 Вт·год /кг;
- питома потужність: 2-14 кВт/кг;
- число циклів заряд/розряд до втрати 20 % ємності: 2000 - 10^6 ;
- саморозряд при кімнатній температурі: 100 % за кілька тижнів;
- напруга максимальна в елементі: 3,3-3,8 В (повністю заряджений);
- напруга мінімальна: 0 В (повністю розряджений);
- діапазон робочих температур: $-20 \dots +70$ °C.

Переваги:

- високі швидкості заряду й розряду;
- дуже велика питома потужність;
- простота зарядного пристрою;
- мала деградація навіть після сотень тисяч циклів заряду/розряду;
- низька токсичність матеріалів;
- висока ефективність (ККД більше 95 %);
- допустимість повного розряду;
- надійність.

Недоліки:

- низька порівняно з акумуляторами питома енергоємність;

- гірші ніж у акумуляторів масогабаритні показники;
- м'яка (майже лінійна) кулон-вольтна характеристика;
- високий саморозряд.

Основним недоліком суперконденсатора як незалежного джерела живлення є м'яка кулон-вольтна характеристика. Напруга на затискачах суперконденсатора змінюється пропорційно до його заряду, в той час як напруга на затискачах акумулятора при його половинному розряді має впасти не більш як на 5%. Таким чином робочою є лише мала частина і без того невеликої запасеної енергії. Окрім того, високий саморозряд не дозволяє залишати суперконденсатор надовго виключеним. Ці недоліки практично повністю виключають можливість використання суперконденсатора в якості незалежного джерела живлення.

Тим не менше, суперконденсатор привертає увагу тим, що його недоліки є «перехресними» до недоліків літій-іонних акумуляторів. Використання обох цих елементів в системі живлення може дозволити усунути практично всі ці вади. В багатьох роботах для покращення енергоефективності електричних кіл пропонувалось використання літій-іонного акумулятора та суперконденсатора, з'єднаних як паралельно так і послідовно, в якості джерела живлення для електромобілів [7, 53, 58, 99, 107, 121], інших електричних транспортних засобів [22, 23], безпроводної мережі датчиків [1], в якості накопичувача енергії на сонячних [14, 56] та вітрових [10] електростанціях.

1.1.3 Аналіз властивостей та показників електромеханічних перетворювачів енергії

Найбільш розповсюдженим видом електромеханічних перетворювачів енергії (ЕМПЕ) є електричні двигуни, в яких електрична енергія спочатку перетворюється в енергію магнітного поля, а потім в механічну. Використання двигунів, що працюють від автономного живлення, охоплює різноманітні області й потужності від мікродвигунів до тягових двигунів електромобілів.

Особливо цікавим та провідним питанням є останнє, а саме нелінійні електричні кола в системі приводу електричних транспортних засобів.

Існує декілька видів електричних двигунів, які можуть бути використані в якості електро механічного перетворювача енергії тягової установки. Серед них:

- асинхронні двигуни;
- синхронні двигуни з контактними кільцями;
- синхронні двигуни з постійними магнітами;
- двигуни постійного струму;
- вентильні двигуни.

Кожен з цих видів має свої переваги та недоліки і свою область застосування.

Асинхронний двигун – електрична машина змінного струму, у якої швидкість обертання ротора не дорівнює швидкості обертання магнітного поля статора (асинхронна). Розрізняють колекторні та безколекторні (індукційні), однофазні і багатофазні асинхронні машини. Найчастіше застосовуються трифазні асинхронні машини, які працюють як електродвигуни, потужністю від частки вата до десятків тисяч кіловат [8].

Частота обертання ротора асинхронної машини завжди менша від частоти обертання магнітного поля і визначається за формулою

$$n = \frac{f \cdot 60}{p} \cdot (1 - s),$$

де f – частота змінного струму джерела живлення, Гц;

p – кількість пар полюсів первинної обмотки;

s – ковзання ротора [91].

При стандартній частоті струму $f=50$ Гц частота обертання магнітного поля може дорівнювати 3000, 1500, або 1000 об/хв в залежності від кількості пар полюсів первинної обмотки ($p = 1$; $p = 2$; $p = 3$ і т. д.). Щоб досягти більшої частоти обертання магнітного поля, первинну обмотку асинхронної машини живлять струмом підвищеної частоти (50–400 Гц). Швидкість обертання ротора

асинхронної машини регулюють зміною частоти струму живлення, або зміною кількості пар полюсів первинної обмотки (ступінчасте регулювання), а також, зміною ковзання. Ковзання змінюють за допомогою активного опору, який вводять у вторинне коло асинхронної машини, каскадних схем, або способом зміни напруги, підведеної до первинної обмотки асинхронної машини [105].

Переваги:

- простота конструкції;
- високий ККД;
- висока надійність;
- невисока вартість.

Недоліки:

- залежність швидкості від навантаження (наявність ковзання);
- необхідність в охолодженні ротора;
- низький пусковий момент.

Асинхронний двигун є найбільш розповсюдженою електричною машиною завдяки своїй простоті конструкції та відносній дешевизні. Незважаючи на складнощі в керуванні швидкістю з розвитком напівпровідникової перетворювальної техніки асинхронні двигуни стали дуже актуальними і в електричному транспорті з автономним живленням [57, 72, 118].

На рис. 1.1 зображена карта залежності ККД асинхронного двигуна від швидкості обертання його ротора та моменту на валу. З неї видно, що найбільш ефективно асинхронний двигун працює на високих швидкостях та при малих навантаженнях. В транспортних засобах, однак, навантаження росте зі зростанням швидкості, що означає, що асинхронний двигун не буде працювати в своєму оптимальному режимі, хоча все рівно він має одні з найкращих характеристик [69].

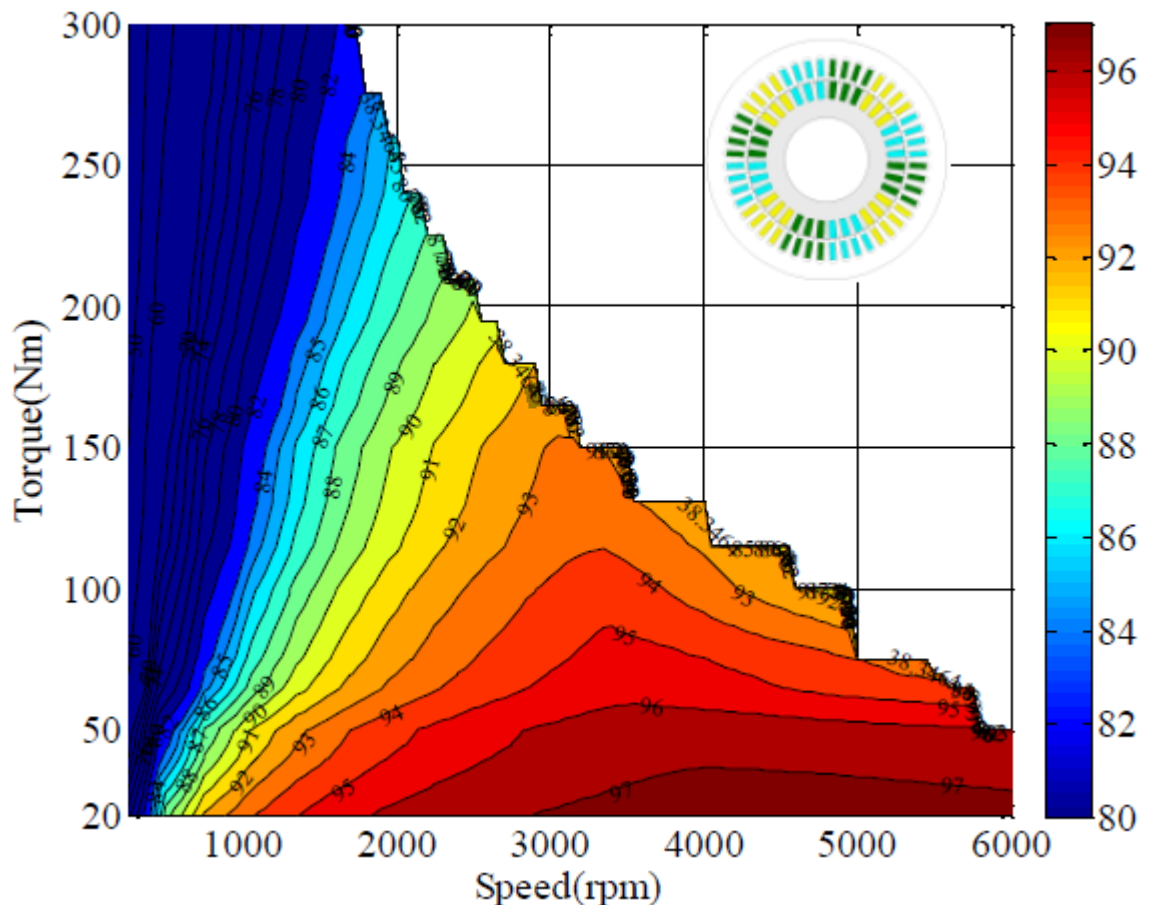


Рисунок 1.1– Карта залежності ККД асинхронного двигуна від швидкості обертання його ротора та моменту на валу

Синхронний двигун з контактними кільцями на відміну від асинхронного двигуна має постійну частоту обертання при різних навантаженнях. Синхронні двигуни знаходять застосування для приводу машин постійної швидкості (насоси, компресори, вентилятори) [59].

В статорі синхронного двигуна розміщена обмотка, яка підключається до мережі трифазного струму і утворює магнітне поле, що обертається. Ротор двигуна побудований із сердечника з обмоткою збудження. Остання через контактні кільця підключається до джерела постійного струму. Струм проходячи через обмотку збудження породжує магнітне поле, яке намагнічує ротор.

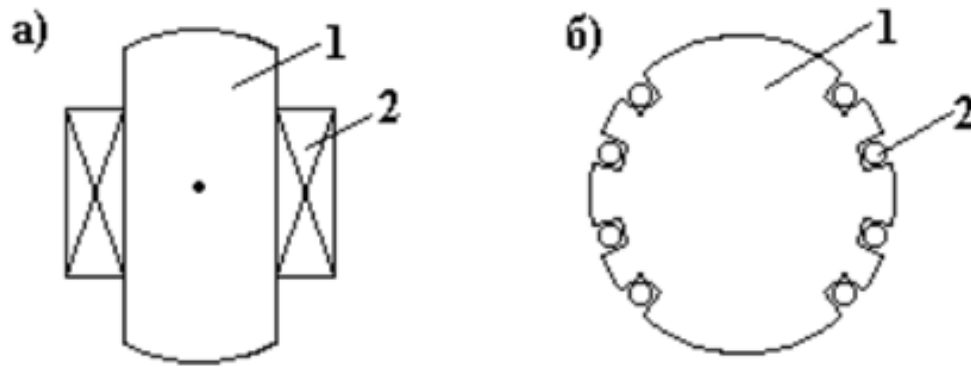


Рисунок 1.2 – Явнополюсна (а) та неявнополюсна (б) будова ротора синхронного двигуна.

Будова ротора синхронного двигуна зображена на рис 1.2. Ротори можуть бути явнополюсними (з явно вираженими полюсами) і неявнополюсними (з неявно вираженими полюсами). На рис. 1.2 а) показане осердя 1 явнополюсного ротора з полюсами, що виступають. На полюсах розміщені котушки збудження 2. На зображенні б) показаний неявнополюсний ротор, який є феромагнітним циліндром 1. На поверхні ротора в осьовому напрямі фрезерують пази, в які вкладають обмотку збудження 2.

Переваги:

- високий ККД;
- швидкість не залежить від навантаження;
- малий нагрів ротора.

Недоліки:

- наявність рухомих електричних контактів (контактні кільця);
- необхідність в частому обслуговуванні.

У зв'язку з наявністю рухомих електричних контактів встановлення і використання синхронного двигуна не на статичному фундаменті є ненадійним. Тому ці двигуни практично не використовуються в системах з автономним живленням [93].

Синхронний двигун з постійними магнітами за будовою відрізняється від двигуна з контактними кільцями тим, що замість котушки індуктивності на

роторі магнітне поле створюють постійні магніти. Характеристики та принцип роботи синхронного двигуна з постійними магнітами такі самі, як і у синхронного двигуна з контактними кільцями.

Переваги:

- найбільший в порівнянні з іншими двигунами ККД;
- швидкість не залежить від навантаження;
- практично відсутній нагрів ротора.

Недоліки:

- неможливість регулювання магнітного потоку;
- трохи гірші ніж у інших двигунів масогабаритні показники;
- висока вартість рідкоземельних магнітів;
- розмагнічування постійних магнітів.

Найбільший ККД серед усіх видів двигунів зразу привертає увагу до синхронного двигуна з постійними магнітами, не зважаючи на підвищену вартість. Але не все так однозначно. Постійні магніти мають властивість розмагнічуватись при ударах та вібраціях, що часто спостерігається в системах, які потребують автономного живлення (транспортні засоби). Це зменшує довговічність даного двигуна. Окрім того, неможливість прямого регулювання магнітного потоку викликає необхідність у проектуванні перетворювача одночасно як на високу напругу, так і на високий струм [83]. Часто використовують методи непрямого керування магнітним потоком [17, 68].

На рис. 1.3 зображена карта залежності ККД синхронного двигуна від швидкості обертання його ротора та моменту на валу. З неї видно, що найбільш ефективно синхронний двигун працює при невисоких швидкостях та навантаженнях. З цього можна зробити висновок, що синхронний двигун з постійними магнітами вигідно використовувати в системах, які мусять більшість часу працювати на малому навантаженні, але бути розраховані на великі перевантаження (наприклад, міський транспорт, що вимушений рухатись з невисокою швидкістю руху в місті) [43, 69].

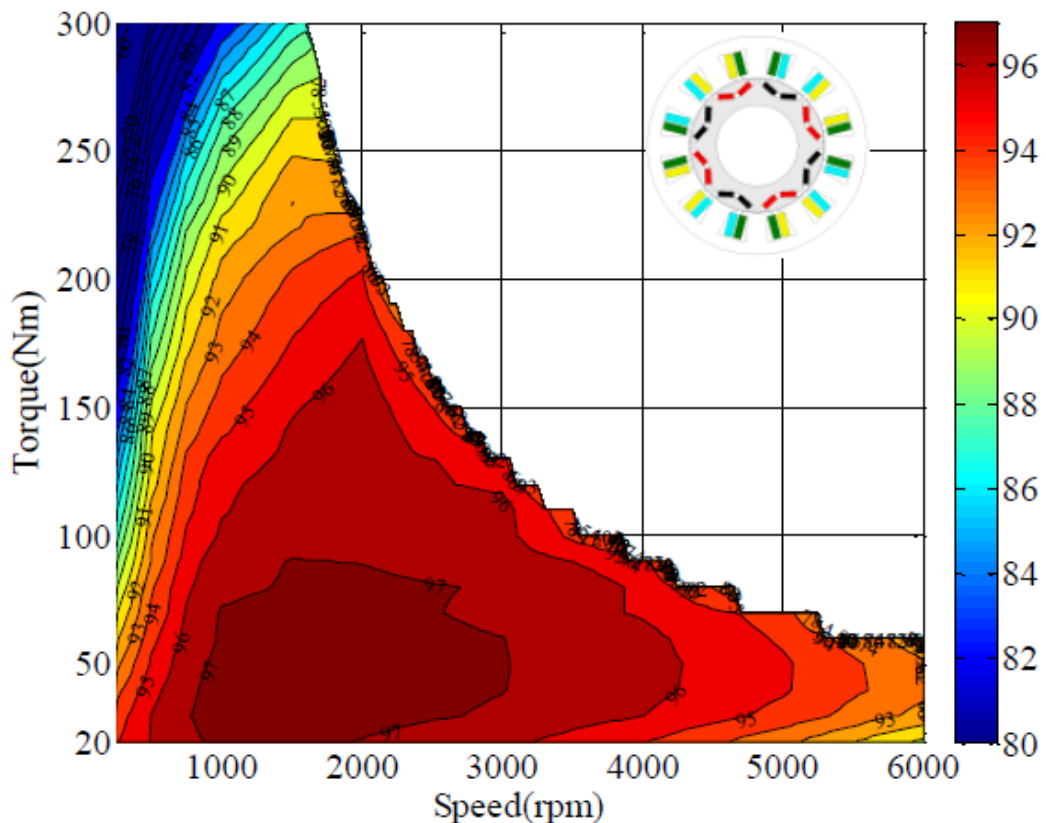


Рисунок 1.3– Карта залежності ККД синхронного двигуна від швидкості обертання його ротора та моменту на валу

Двигун постійного струму – електрична машина постійного струму, що перетворює електричну енергію на механічну. В двигуні явище електромагнітної індукції при взаємодії струму обмотки ротора (якоря) з основним магнітним полем зумовлює появу електромагнітного обертального моменту. Розрізняють двигуни постійного струму з паралельним (незалежним), послідовним та змішаним збудженням. Схема двигуна постійного струму зображена на рис. 1.4. Потужність електродвигуна постійного струму – від часток вата до тисяч кіловат, ККД – від 0,02 - 0,03 до 0,93. Електродвигуни постійного струму дають змогу плавно і в широких межах регулювати частоту обертання, вдаючись до зміни струму в колі ротора за допомогою додаткового електричного опору, до зміни живильної напруги, а також до зміни магнітного потоку реостатом. Застосовують їх у промислових і транспортних електроприводах, пристроях автоматики, підйомних кранах, на прокатних станах тощо.

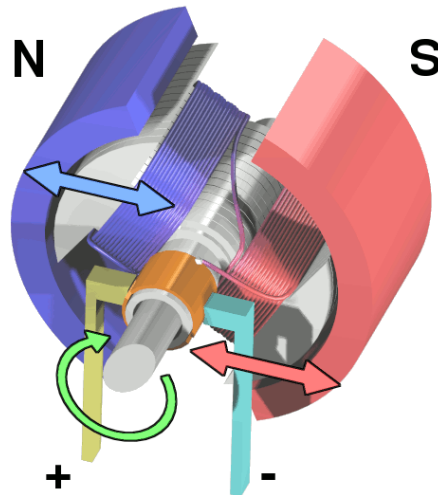


Рисунок 1.4 – Схема найпростішого колекторного двигуна постійного струму з двополюсним статором і з двополюсним ротором

Переваги:

- простота керування;
- лінійна механічна характеристика;
- відсутність необхідності трьохфазних інверторів в системах живлення від акумулятора;
- високий пусковий момент;
- двигун постійного струму з послідовним живленням може живитись від однофазного змінного струму.

Недоліки:

- нижчий ніж у інших електричних двигунів ККД;
- наявність силового рухомого контакту;
- гірші ніж у інших двигунів масогабаритні показники;
- залежність швидкості від навантаження;
- необхідність охолодження ротора.

Більше десяти років тому двигун постійного струму був одним з найпопулярніших двигунів для тягових установок за рахунок свого високого пускового моменту та, що найголовніше, простоті в керуванні (він має майже лінійну механічну характеристику) [35]. Проте, з розвитком напівпровідникової

техніки настав момент, коли встановити напівпровідникову систему управління до інших двигунів практично будь-якої складності стало дешевше, ніж поставити чисто двигун постійного струму. Тому, останні використовуються вже рідко, в системах де вкрай необхідний високий пусковий момент і нема можливості його досягти іншими засобами.

Вентильний двигун (ВД) – це замкнута електромеханічна система, що складається з синхронної машини, датчика положення ротора, перетворювача координат і підсилювача потужності. Механічна і регульовальна характеристики вентильного двигуна лінійні та ідентичні механічній та регульовальній характеристикам електродвигуна постійного струму. Як і електродвигуни постійного струму, вентильні двигуни працюють від мережі постійного струму. ВД можна розглядати як двигун постійного струму, в якому щітково-колекторний вузол замінений електронікою, що підкреслюється словом «вентильний», тобто «керований силовими ключами» (вентиллями). Фазні струми вентильного двигуна мають синусоїдальну форму. Поперечний переріз вентильного двигуна зображений на рис. 1.5. Як правило, в якості підсилювача потужності застосовується автономний інвертор напруги з широтно-імпульсною модуляцією. Вентильний двигун слід відрізнити від безколекторного двигуна постійного струму (БДПС), який має трапецієподібний розподіл магнітного поля в повітряному проміжку і характеризується прямокутною формою фазних напруг. Структура БДПС простіша ніж структура ВД (відсутній перетворювач координат, замість ШІМ використовується 120- або 180-градусна комутація, реалізація якої простіша за ШІМ). Вентильні двигуни, що поєднують в собі надійність машин змінного струму з хорошою керованістю машин постійного струму, є альтернативою двигунам постійного струму, які характеризуються рядом вад, пов'язаних зі щітково-колекторним вузлом, таких як іскріння, перешкоди, знос щіток, поганий тепловідвід якоря та інші. Відсутність щітково-колекторного вузла дозволяє застосовувати ВД там, де використання двигуна постійного струму ускладнене або неможливе [110] .

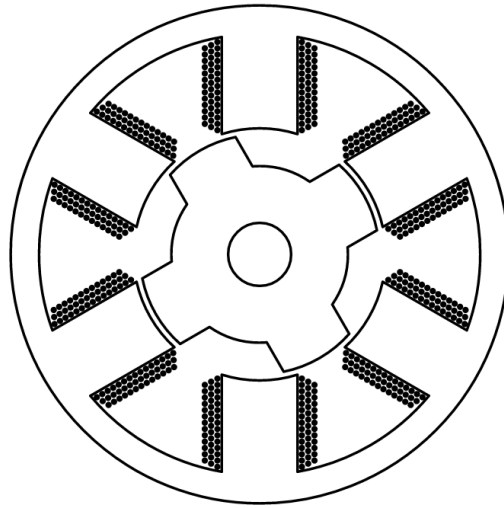


Рисунок 1.5 – Поперечний переріз вентильного двигуна

Переваги:

- простота конструкції;
- простота керування;
- майже лінійна механічна характеристика;
- майже відсутній нагрів ротора.

Недоліки:

- набагато гірші ніж у інших двигунів масогабаритні показники;
- трохи нижчий ніж у інших електричних двигунів ККД;
- підвищені шум і вібрація.

Незважаючи на те, що принцип роботи вентильних двигунів схожий на принцип роботи синхронних двигунів, за рахунок спеціальної системи керування характеристика вентильних двигунів майже повністю співпадає зі зручною для керування характеристикою двигунів постійного струму. Це призвело до тенденції установлення вентильних двигунів там, де раніше вважалось би за доцільним поставити двигун постійного струму. Виграш у керуванні, однак, здобувається ціною програшу в масогабаритних показниках [5, 15, 21, 54, 64].

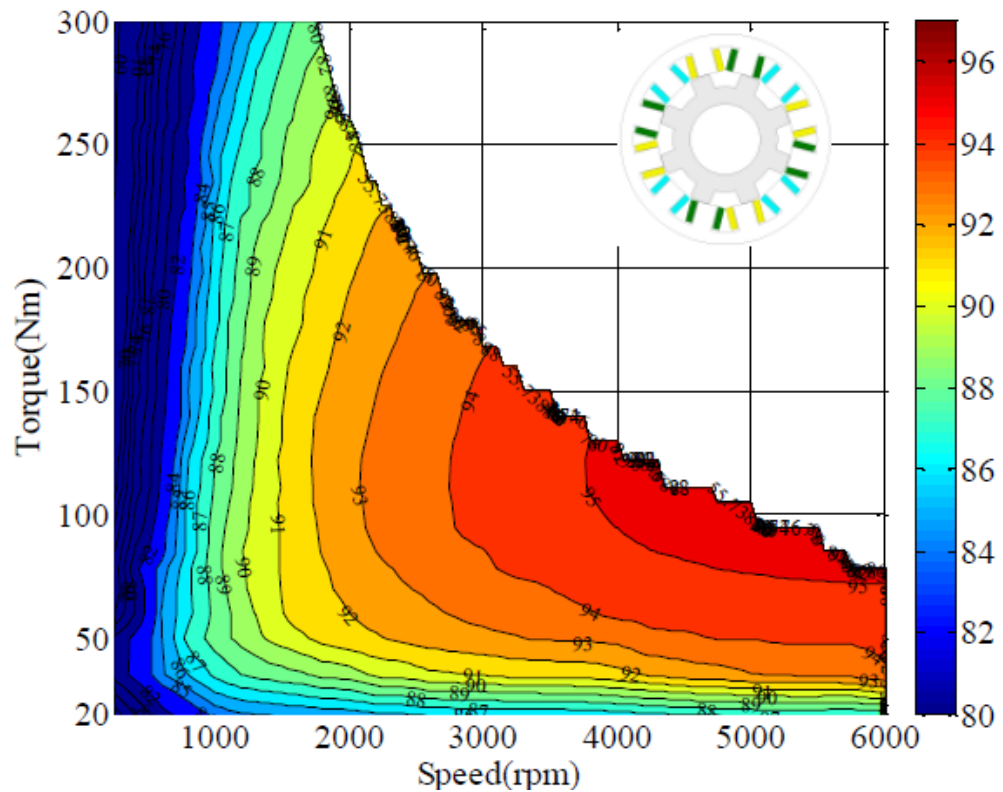


Рисунок 1.6— Карта залежності ККД вентильного двигуна від швидкості обертання його ротора та моменту на валу

Карта залежності ККД вентильного двигуна від швидкості обертання його ротора та моменту на валу зображена на рис. 1.6. З неї видно, що найефективніше вентильний двигун працює на великих швидкостях та навантаженнях. Зона ефективності вентильного двигуна «протилежна» до зони ефективності синхронного та асинхронного двигунів. Це дозволяє чітко розмежувати сфери доцільності використання цих видів двигунів: вентильні двигуни підходять до приводів транспортних засобів, які будуть використовуватись на максимумі своїх потужностей (спорт-кари тощо), в той час як для міської їзди вигідніше використовувати асинхронні двигуни чи синхронні двигуни з постійними магнітами (останні дорожчі, тому частіше вибір схиляється до асинхронних двигунів) [28, 69, 72, 112, 113, 119].

1.1.4 Силовий електронний перетворювач як регулятор потоку енергії електричного кола

Автономне джерело живлення електричного кола створює ЕРС постійного струму, в той час як більшість ЕМПЕ з боку навантаження споживають трифазну синусоїдну напругу. Для поєднання цих елементів в одному колі необхідна додаткова ланка силового електронного перетворювача. Інвертор – це перетворювач, який перетворює постійну напругу та струм у синусоїдну. Розрізняють інвертори напруги та інвертори струму, які для навантаження являють собою джерела напруги та струму відповідно. Оскільки регульовані ЕМПЕ керуються джерелом напруги, то і в досліджуваному колі варто застосовувати саме інвертор напруги. Також розрізняють автономні, частота напруги на виході яких задається самим інвертором, та ведені інвертори, частота напруги на виході яких задається зовнішніми джерелами живлення. Для досліджуваного нелінійного кола з автономними ЕМПЕ необхідно застосовувати автономний інвертор напруги.

Також інвертори розділяють на однофазні та трифазні. Серед однофазних виділяють:

- мостові;
- напівмостові;
- з середньою точкою.

Ці види інверторів розрізняються схемою підключення вентилів. Від вибору схеми залежить значення напруги на виході та ККД інвертора.

Серед трифазних виділяють:

- системи трьох однофазних інверторів;
- мостові за схемою Ларіонова.

Використання трифазних інверторів за схемою Ларіонова (рис. 1.7) дозволяє зменшити кількість напівпровідникових елементів у схемі, а значить і збільшити ККД перетворювача [86].

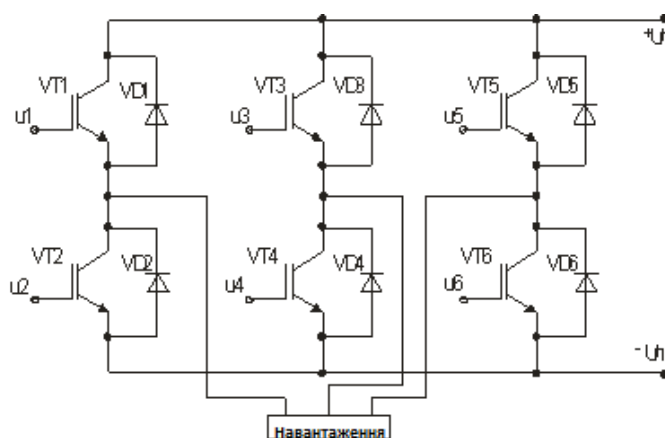


Рисунок 1.7 – Схема перетворювача електричної енергії, складеного за схемою Ларіонова

На теперішній час існує багато різних видів напівпровідникових елементів, які можна застосовувати у якості керованих вентилів для інвертора. Дослідження показують, що з точки зору як швидкості комутації так і енергоефективності найдоцільніше застосовувати перетворювач на IGBT-транзисторах.

1.2 Аналіз досліджень з покращення енергоефективності нелінійних електричних кіл

Оскільки покращення ефективності перетворення енергії в нелінійних електричних колах є важливою актуальною задачею, для вирішення якої було проведено ряд досліджень. Наприклад, в роботі [11] були досліджені характеристики свинцево-кислотної акумуляторної батареї, що може застосовуватись в таких колах, а в роботі [58] пропонувалось застосовувати разом з таким акумулятором і суперконденсатор (рис. 1.8). У роботі [26] для контролю за втратами була запропонована система контролю стану заряду нікель-манган-гідридних акумуляторів, що використовуються у гібридних транспортних засобах.

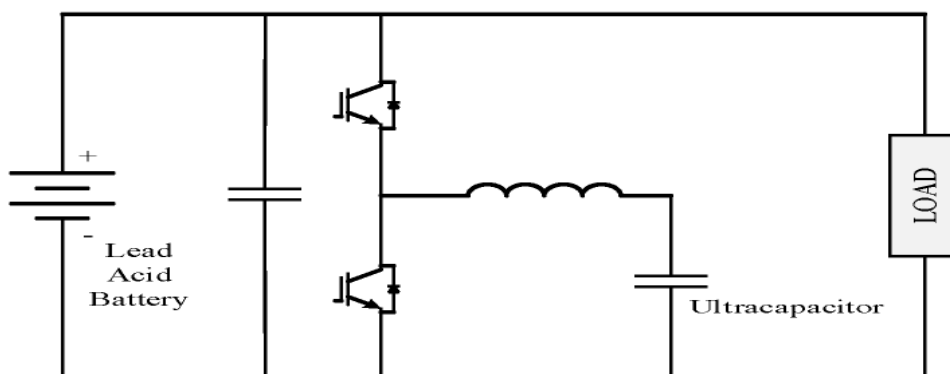


Рисунок 1.8 – Схема із джерелом живлення, що використовує паралельне з'єднання акумулятора та суперконденсатора

Але загалом більшість робіт стосуються досліджень саме літій-іонних акумуляторів як найбільш придатних для об'єктів застосувань таких кіл – автономних транспортних засобів. І у багатьох роботах для покращення енергоефективності пропонується використовувати разом з акумулятором ще і суперконденсатори.

Паралельне з'єднання акумулятора і суперконденсатора було розглянуто в роботі [121]. Щоправда, у запропонованому авторами варіанті навантаження було змодельоване лінійним резистором. У такій схемі застосування суперконденсатора не виявилось ефективним. Отже, використання такої схеми може бути доцільне лише при нелінійних навантаженнях, як-от електромеханічних перетворювачах енергії, оскільки саме при таких схемах через джерело живлення будуть проходити пікові струми, роботу з відтермінування яких і виконує суперконденсатор.

У статті [13] продемонстровано, як використання суперконденсаторів покращує енергоефективність електроприводів підчас розгону двигуна. У цьому режимі роботи навантаженням споживається потужність, у кілька разів більша за номінальну, а отже через джерело живлення проходять значні струми. При підключенні паралельно до акумулятора суперконденсатора основна частина цих струмів припадає саме на останній, а оскільки він має менший ніж акумулятор опір, то і втрати енергії будуть меншими.

Подібний аналіз також був проведений у роботі [36]. У ній, окрім розгону, також розглядались режими гальмування. Під час гальмування транспортного засобу можлива рекуперація енергії – перетворення механічної енергії руху назад у електричну. Рекуперативне гальмування, очевидно, допомагає суттєво покращити енергоефективність електропривода за певний період роботи, під час якого були часті старты та зупинки. Автори даної роботи продемонстрували, що за один гальмівний шлях на суперконденсаторі можливо рекуперувати більше електричної енергії, ніж на акумуляторі. Подібні дослідження також проведені в роботі [12] для іншого транспортного засобу.

У роботах [10] та [23] була розглянута мінімізація споживання енергії у колі, подібному до того, яке розглядається в даній дисертації. У цих роботах покращення енергоефективності досягалось шляхом регулювання графіку навантаження кола. У якості прикладу застосування кола розглядався автономний поїзд, а мінімізація споживання енергії проводилась шляхом корегування динаміки його руху.

Система з використанням перетворювачів постійного струму була розглянута у роботі [32]. В ній пропонувалось покращити енергоефективність такого кола шляхом об'єднання перетворювачів постійного струму від різних джерел (акумулятора та суперконденсатора), зменшивши таким чином кількість напівпровідникових елементів в колі, на яких відбуваються теплові втрати.

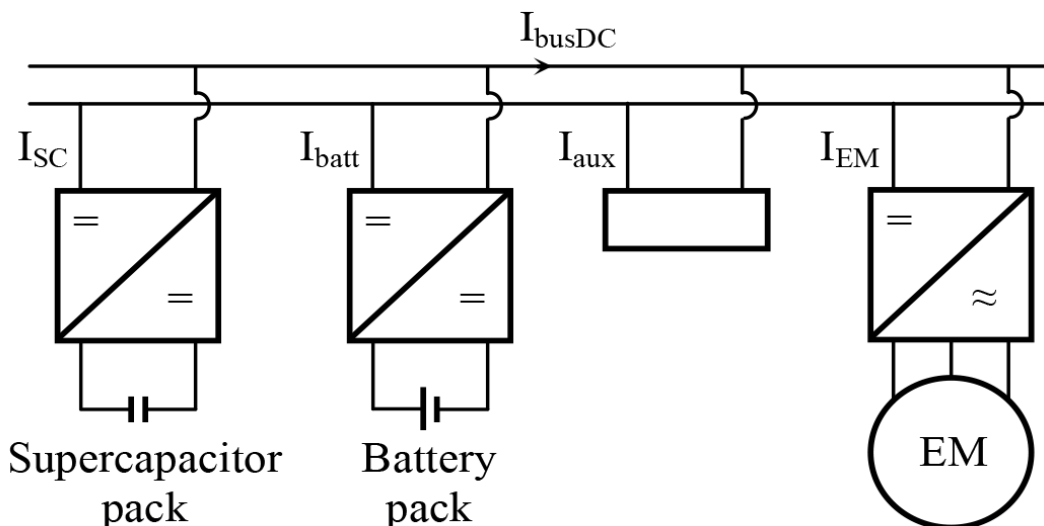


Рисунок 1.9 – Система живлення автономного транспортного засобу

Різні спеціальні системи з розподілу енергії між джерелами живлення для покращення енергоефективності кола були представлені в роботах [7, 39, 67]. Ці системи запропоновані для кіл, у яких є ще додаткове паливне джерело живлення – електрогенератор – тобто для застосування у гібридних транспортних засобах. Наприклад, в роботі [7] (рис. 1.9) показана система, в якій суперконденсаторна та акумуляторна батареї з'єднані паралельно кожна через свій перетворювач постійного струму, а далі через інвертор живлення подається на електродвигун. У роботі [67] було запропоновано покращення такої системи шляхом об'єднання перетворювачів постійного струму в один (рис. 1.10). Правильно розподіляючи постачання енергії між джерелами живлення, серед яких генератор, акумулятор та суперконденсатор, можливо мінімізувати її споживання. У роботі [38] було показано, що у подібних гібридних транспортних засобах можливо і взагалі не використовувати акумулятор. Система живлення генератор-суперконденсатор дає практично такі ж самі динамічні характеристики, як і генератор-акумулятор, і є більш енергоефективною.

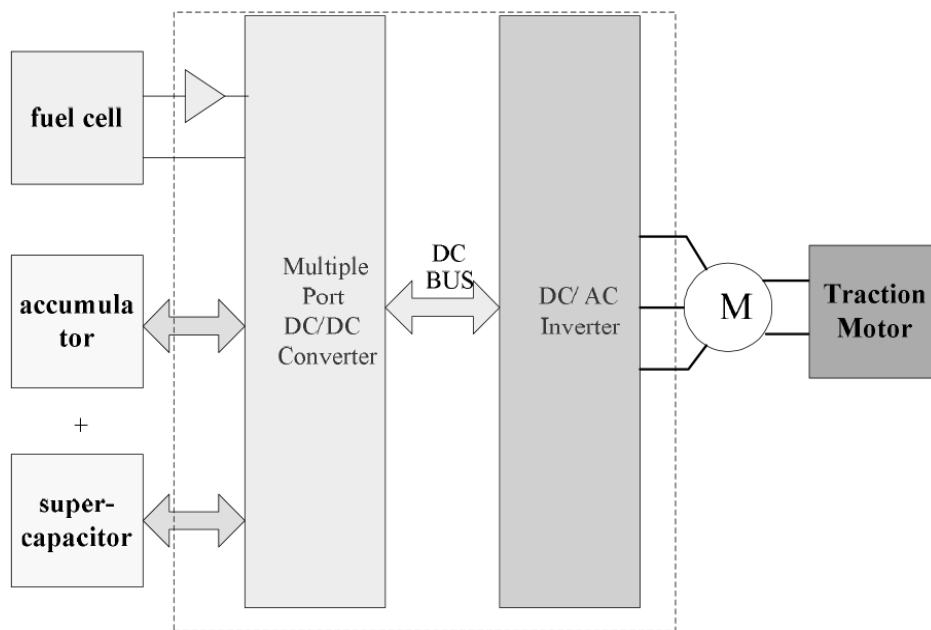


Рисунок 1.10 – Покращена система живлення з об'єднанням перетворювачів постійного струму

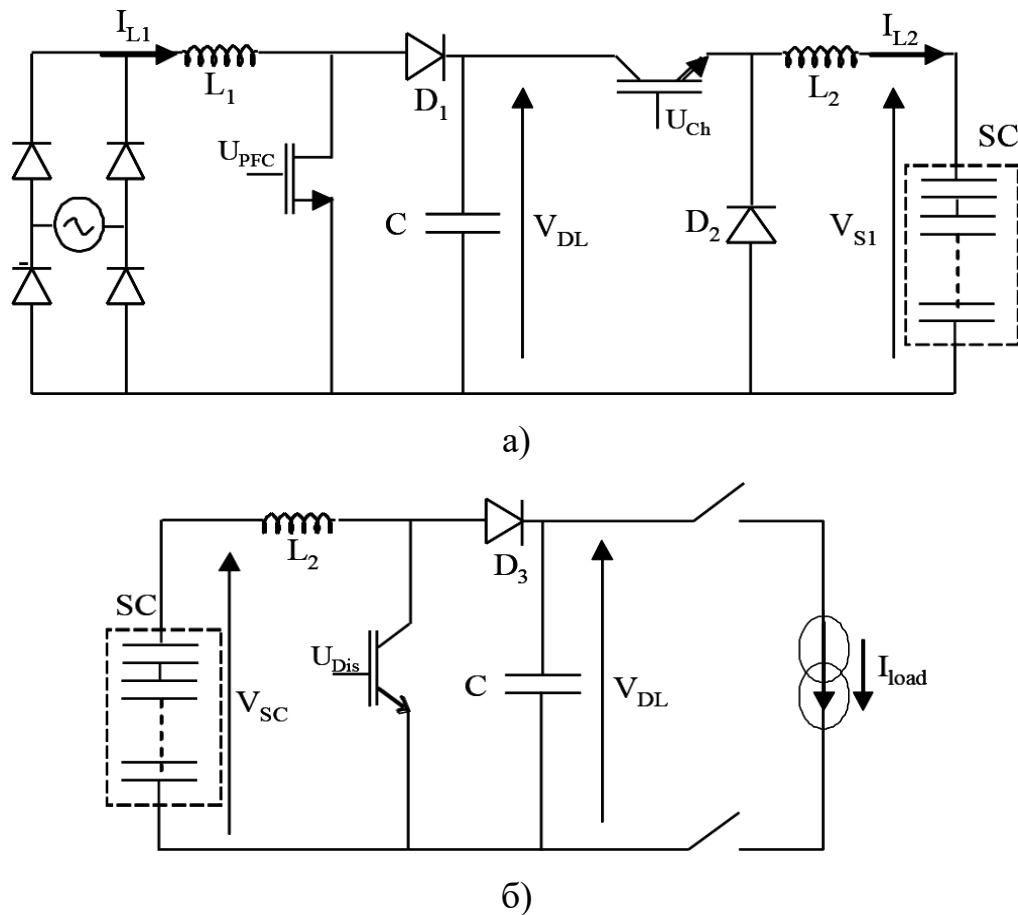


Рисунок 1.11 – Електричні кола а) заряду та б) розряду суперконденсатора при використанні для живлення транспортних засобів із додатковим джерелом живлення

У роботі [4] наведено приклад електропривода, який працює від суперконденсатора, що заряджається з відновлювальних джерел енергії: вітрогенератора чи сонячної панелі (рис. 1.11). Сама батарея суперконденсаторів підключена по чергово до генератора (рис. 1.11а) та на навантаження (рис. 1.11б).

У роботі [46] показано, що використання суперконденсаторів, паралельно підключених до літій-іонних акумуляторів, не тільки покращує енергоефективність схеми, але і є економічно обґрунтованим рішенням.

1.3 Постановка задач дослідження

Проблема підвищення ефективності перетворення енергії в нелінійних електричних колах зі змінним навантаженням обумовлена зростаючими вимогами до економічності електротранспортних засобів, особливо в умовах міського руху. За результатами аналізу проведених досліджень в даній області можна зробити наступні висновки:

1. Літій-іонні акумулятори, які найбільш широко застосовуються у якості джерел ЕРС таких електричних кіл, мають значний внутрішній електричний опір, що знижує їхній ККД. Це призводить до зростання втрат в усьому електричному колі та зниження його енергоефективності.

2. Електричне коло містить також джерело ЕРС електромеханічного перетворювача, величина якої швидко змінюється в процесі перехідних процесів, обумовлених частими розгонами та сповільненнями транспортного засобу в умовах міського руху. Це джерело працює як в режимі споживача так і генератора електроенергії, впливаючи на енергоефективність електричного кола.

3. Для покращення ефективності нелінійних електричних кіл використовуються різні схеми підключення до акумулятора суперконденсатора, як ефективного накопичувача енергії, що має високу швидкість заряду й розряду, а також велику питому потужність. Проте питання визначення величини ємності суперконденсаторів та схем їх заряду й розряду в колі з автономним електромеханічним перетворювачем потребують додаткових досліджень.

4. Існуючі математичні моделі нелінійних електричних кіл зі змінним навантаженням не враховують повний перелік нелінійностей, не враховують особливості зміни ЕРС перетворювача, містять недостатньо точні математичні моделі акумуляторів в поєднанні з накопичувачами енергії на суперконденсаторах, що не дозволяє дати адекватний висновок про енергоефективність таких кіл.

5. Заступні схеми основних елементів електричного кола – акумулятора, суперконденсатора, силового електронного перетворювача, електродвигуна містять нелінійності, що значно ускладнює дослідження енергоефективності кола аналітичними методами в умовах великої розмірності розрахункової моделі. Це обумовлює використання чисельних методів та моделювання для дослідження ефективності перетворення енергії в таких колах.

Таким чином, актуальним є наукове завдання з підвищення ефективності перетворення енергії в нелінійних електричних колах зі змінним навантаженням шляхом удосконалення його структури та методу розрахунку параметрів джерела живлення та накопичувача електроенергії на основі аналізу перехідних та усталених процесів. Для вирішення наукового завдання необхідно вирішити наступні основні задачі дослідження:

1. Розробити математичну модель нелінійного електричного кола зі змінним навантаженням для дослідження енергоефективності кола, яка повинна відрізнятися від існуючих моделей врахуванням нелінійностей джерела на основі літій-іонного акумулятора та накопичувачів енергії на основі суперконденсаторів, а також нелінійностей електромеханічного перетворювача енергії. Модель повинна також враховувати різні схеми підключення суперконденсаторів до джерела живлення та динамічну зміну величини і напрямку ЕРС електродвигуна й дискретний характер формування його напруги живлення за допомогою силового електронного перетворювача.

2. Дослідити ефективність перетворення енергії в нелінійному електричному колі зі змінним навантаженням в динамічних режимах в залежності від реальних умов роботи кола електротранспортних засобів, параметрів пасивних та активних елементів, в тому числі від ємності суперконденсаторів та схем їх підключення до джерела.

3. Удосконалити метод підвищення ефективності перетворення енергії в нелінійному електричному колі зі змінним навантаженням шляхом вибору раціональної структури та розрахунку параметрів джерела живлення і

накопичувача енергії, що дозволяє зменшити споживання колом електроенергії при відпрацюванні одного і того самого графіку навантаження.

РОЗДІЛ 2

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ НЕЛІНІЙНОГО ЕЛЕКТРИЧНОГО КОЛА ЗІ ЗМІННИМ НАВАНТАЖЕННЯМ

2.1 Математичний опис нелінійного елемента кола – електромеханічного перетворювача енергії

Результати аналізу у першому розділі показали, що найбільш доцільним для дослідження електромеханічним перетворювачем енергії є асинхронний двигун (АД). Існує низка математичних моделей АД [102], що відрізняються вибором системи координат, в якій розраховуються електромагнітні процеси. Вибір системи координат не впливає на реальні фізичні процеси, що протікають в двигуні, проте форму запису математичних рівнянь визначає зручність використання для вирішення конкретних задач. Найчастіше використовуються моделі в наступних системах координат:

- природні координати електричної машини;
- нерухомі ортогональні координати;
- обертові ортогональні координати;
- полярні координати;
- безкоординатні (тензорні) моделі.

При складанні рівнянь використовуються наступні припущення:

- нехтуються втрати в сталі на гістерезис та вихрові струми;
- нехтується насиченість магнітопроводу;
- вважається, що розподіл магнітного поля в повітряному проміжку є синусоїдальним;
- вважається, що повітряний проміжок між статором та ротором є рівномірним, нехтується наявність зубців та пазів;
- припускається, що статор та ротор мають симетричні трифазні обмотки, а обмотка ротора приведена до кількості витків обмотки статора [111].

2.1.1 Математична модель електромеханічного перетворювача енергії в природних координатах

Запис рівнянь фізичних процесів в електромеханічному перетворювачі енергії є найбільш наочним та зрозумілим в системі природних координат. В такій моделі всі величини в системі рівнянь мають свій фізичний сенс та реальне значення. Також в такій моделі є можливість врахувати несиметрію як напруги живлення, так і параметрів обмоток, а також несинусоїдальність вхідної напруги на затискачах. Еквівалентна схема трифазного асинхронного двигуна зображена на рис. 2.1.

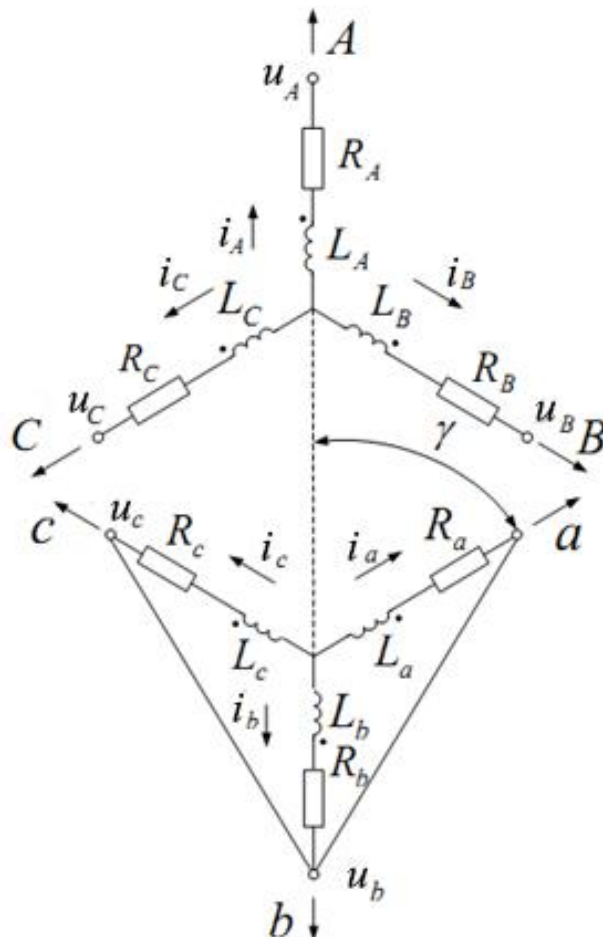


Рисунок 2.1 – Еквівалентна схема трифазного асинхронного двигуна

Рівняння за законом Ома для фаз статора та ротора має вид:

$$\begin{cases} u_A = i_A R_A + d\psi_A / dt \\ u_B = i_B R_B + d\psi_B / dt \\ u_C = i_C R_C + d\psi_C / dt \end{cases} \quad \begin{cases} u_a = i_a R_a + d\psi_a / dt \\ u_b = i_b R_b + d\psi_b / dt \\ u_c = i_c R_c + d\psi_c / dt \end{cases}, \quad (2.1)$$

де u_A – миттєве значення напруги на затискачах фази A ;

i_A – миттєве значення струму фази A ;

Ψ_A – повне потокозчеплення фази A ;

R_A – активний опір обмотки фази A .

Потокозчеплення статора та ротора виражаються наступним чином:

$$\begin{aligned} \psi_A &= L_A i_A + M_{AB} i_B + M_{AC} i_C + M_{Aa} i_a \cos \gamma + \\ &+ M_{Ab} i_b \cos(\gamma + 2p/3) + M_{Ac} i_c \cos(\gamma - 2p/3) \\ \psi_B &= M_{BA} i_A + L_B i_B + M_{BC} i_C + M_{Ba} i_a \cos(\gamma - 2p/3) + \\ &+ M_{Bb} i_b \cos \gamma + M_{Bc} i_c \cos(\gamma + 2p/3) \\ \psi_C &= M_{CA} i_A + M_{CB} i_B + L_C i_C + M_{Ca} i_a \cos(\gamma + 2p/3) + \\ &+ M_{Cb} i_b \cos(\gamma - 2p/3) + M_{Cc} i_c \cos \gamma \end{aligned}, \quad (2.2)$$

$$\begin{aligned}
\psi_a &= M_{aA} i_A \cos \gamma + M_{aB} i_B \cos(\gamma - 2p/3) + \\
&+ M_{aC} i_C \cos(\gamma + 2p/3) + L_a i_a + M_{ab} i_b + M_{ac} i_c \\
\psi_b &= M_{bA} i_A \cos(\gamma + 2p/3) + M_{bB} i_B \cos \gamma + \\
&+ M_{bC} i_C \cos(\gamma - 2p/3) + M_{ba} i_a + L_b i_b + M_{bc} i_c \\
\psi_c &= M_{cA} i_A \cos(\gamma - 2p/3) + M_{cB} i_B \cos(\gamma + 2p/3) + \\
&+ M_{cC} i_C \cos \gamma + M_{ca} i_a + M_{cb} i_b + L_c i_c
\end{aligned} \tag{2.3}$$

де γ – кут між осями обмоток A статора та a ротора;

L_A – індуктивність обмотки фази A ;

M_{AA} – максимальне значення взаємної індуктивності між обмотками статора та ротора;

M_{AB} – взаємна індуктивність між обмотками фаз A та B .

Враховуючи припущення симетричності обмоток статора та ротора, можна записати рівність значень опорів та індуктивностей:

$$\begin{aligned}
R_A &= R_B = R_C = R_s \\
R_a &= R_b = R_c = R_r \\
M_{AB} &= M_{BA} = M_{BC} = M_{CB} = M_{CA} = M_{AC} = M_1 \\
M_{ab} &= M_{ba} = M_{bc} = M_{cb} = M_{ac} = M_{ca} = M_2 \\
M_{Aa} &= M_{aA} = M_{Ba} = \dots = M_{12}
\end{aligned} \tag{2.4}$$

де R_s – опір обмотки статора;

R_r – опір обмотки ротора;

L_s – індуктивність обмотки статора;

L_r – індуктивність обмотки ротора;

M_1 – взаємна індуктивність між обмотками статора;

M_2 – взаємна індуктивність між обмотками ротора;

M_{12} – взаємна індуктивність між обмотками статора та ротора.

За першим законом Кірхгофа:

$$\begin{aligned} i_A + i_B + i_C &= 0 \\ i_a + i_b + i_c &= 0 \end{aligned} \quad (2.5)$$

Потокозчеплення власного магнітного потоку фази A статора:

$$\begin{aligned} \psi_{sA} &= L_s i_A + M_1 i_B + M_s i_C = L_s i_A + M_1 (i_B + i_C) = \\ &= i_A (L_1 - M_1) = i_A (L_{s\sigma} + L_{s\mu} - M_1) \end{aligned} \quad (2.6)$$

де ψ_{sA} – потокозчеплення власного магнітного потоку фази A статора;

$L_{s\sigma}$, $L_{s\mu}$ – індуктивності обмотки від поля розсіювання та поля основного магнітного потоку відповідно.

Після підстановки формули для взаємної індуктивності:

$$M_1 = L_{s\mu} \cos \frac{2\pi}{3} = -\frac{L_{s\mu}}{2} \quad (2.7)$$

отримується:

$$\psi_{sA} = i_A \left(L_{s\sigma} + \frac{3}{2} L_{s\mu} \right) = L_s i_A, \quad (2.8)$$

де L_s – повна еквівалентна індуктивність фази статора.

Аналогічні перетворення можна зробити також для фаз B та C статора та для всіх трьох фаз ротора:

$$\begin{aligned} \psi_{sB} &= L_s i_B \\ \psi_{sC} &= L_s i_C \\ \psi_{ra} &= L_r i_a \\ \psi_{rb} &= L_r i_b \\ \psi_{rc} &= L_r i_c \end{aligned} \quad (2.9)$$

де ψ_{ra} – потокозчеплення власного магнітного потоку фази A ротора.

За принципом рівності взаємної індуктивності можна записати:

$$\frac{3}{2}L_{s\mu} = \frac{3}{2}L_{r\mu} = \frac{3}{2}M_{12} = L_m, \quad (2.10)$$

де L_m – еквівалентна взаємна індуктивність.

Після всіх перетворень вирази (2.2) та (2.3) можна записати у вигляді:

$$\begin{bmatrix} \psi_A \\ \psi_B \\ \psi_C \\ \psi_a \\ \psi_b \\ \psi_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_s & 0 & 0 \\ 0 & L_s & 0 \\ 0 & 0 & L_s \\ M_{12} \cos \gamma & M_{12} \cos \left(\gamma - \frac{2\pi}{3} \right) & M_{12} \cos \left(\gamma + \frac{2\pi}{3} \right) \\ M_{12} \cos \left(\gamma + \frac{2\pi}{3} \right) & M_{12} \cos \gamma & M_{12} \cos \left(\gamma - \frac{2\pi}{3} \right) \\ M_{12} \cos \left(\gamma - \frac{2\pi}{3} \right) & M_{12} \cos \left(\gamma + \frac{2\pi}{3} \right) & M_{12} \cos \gamma \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_A \\ i_B \\ i_C \\ i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (2.11)$$

Миттєва електромагнітна енергія обмоток двигуна дорівнює:

$$W_e = \frac{1}{2} (\psi_A i_A + \psi_B i_B + \psi_C i_C + \psi_a i_a + \psi_b i_b + \psi_c i_c) \quad (2.12)$$

Електромагнітний момент визначається як похідна від енергії за геометричним кутом:

$$M = \frac{\partial W_e}{\partial \gamma} Z_p, \quad (2.13)$$

де M – електромагнітний момент двигуна;

z_p – кількість пар полюсів двигуна.

Рівняння механічного руху записується у вигляді:

$$M - M_c = J \frac{\partial \omega}{\partial t}, \quad (2.14)$$

де M_c – момент навантаження на валу двигуна, що включає в себе момент від сил тертя та корисне навантаження електропривода (для електричних транспортних засобів він залежатиме від швидкості руху та якості покриття);

ω – кутова швидкість обертання ротора, рад/с;

J – приведений до валу двигуна момент інерції електропривода.

Рівняння (2.1), (2.11) та (2.14) утворюють повну систему рівнянь асинхронного двигуна в природних координатах.

Очевидним недоліком цієї системи є її громіздкість та складність, а також наявність періодичних коефіцієнтів диференціальних рівнянь. Для того, аби замінити періодичні коефіцієнти постійними використовується векторний (комплексний) запис електромагнітних параметрів кола [80]. Після перетворень система рівнянь АД в природних координатах набуде наступного вигляду:

$$\begin{aligned}
u_s^h &= R_s i_s^h + \frac{d\psi_s^h}{dt} + \omega_k B \psi_s^h \\
0 &= R_r i_r^h + \frac{d\psi_r^h}{dt} + (\omega_k - \omega) B \psi_r^h \\
\psi_s^h &= L_s i_s^h + L_m i_r^h \\
\psi_r^h &= L_r i_r^h + L_m i_s^h \\
M &= \frac{3}{2} Z_p L_m (i_{sy} i_{rx} - i_{sx} i_{ry}) \\
\frac{J}{Z_p} \frac{d\omega}{dt} &= M - M_c
\end{aligned} \tag{2.15}$$

де

$$\begin{aligned}
L_s &= \begin{bmatrix} L_s & 0 & 0 \\ 0 & L_s & 0 \\ 0 & 0 & L_s \end{bmatrix} & R_s &= \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} \\
L_r &= \begin{bmatrix} L_r & 0 & 0 \\ 0 & L_r & 0 \\ 0 & 0 & L_r \end{bmatrix} & R_r &= \begin{bmatrix} R_r & 0 & 0 \\ 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & R_r \end{bmatrix} \\
L_m &= \begin{bmatrix} L_m & 0 & 0 \\ 0 & L_m & 0 \\ 0 & 0 & L_m \end{bmatrix}
\end{aligned}$$

– матриці індуктивностей статора та ротора, взаємної індуктивності, активних опорів обмоток;

ω_k – частота обертання магнітного поля статора.

Верхній індекс h (2.15) вказує на приналежність параметру до обертової системи координат.

У випадку, коли процеси в АД симетричні відносно фаз, систему (2.15) можна ще спростити до наступного вигляду:

$$\begin{aligned}
\vec{u}_s &= R_s \vec{i}_s + \frac{d\vec{\psi}_s}{dt} + \omega_k B \vec{\psi}_s \\
0 &= R_r \vec{i}_r + \frac{d\vec{\psi}_r}{dt} + (\omega_k - \omega) B \vec{\psi}_r \\
\vec{\psi}_s &= L_s \vec{i}_s + L_m \vec{i}_r \\
\vec{\psi}_r &= L_r \vec{i}_s + L_m \vec{i}_s \\
M &= \frac{3}{2} Z_p \frac{L_m}{L_r} \vec{\psi}_r \times \vec{i}_s \\
\frac{J}{Z_p} \frac{d\omega}{dt} &= M - M_c
\end{aligned} \tag{2.16}$$

Ця система рівнянь є простішою за повну, але все одно є складною для розрахунків, особливо в умовах несиметрії. Саме тому частіше використовується двохосьова модель на базі ортогональних координат.

2.1.2 Динамічна модель електромеханічного перетворювача енергії на базі ортогональних координат з використання перетворення Парка

Для розрахунків статичних процесів можна розглядати однофазні еквівалентні кола заміщення асинхронного двигуна (рис. 2.2-2.3).

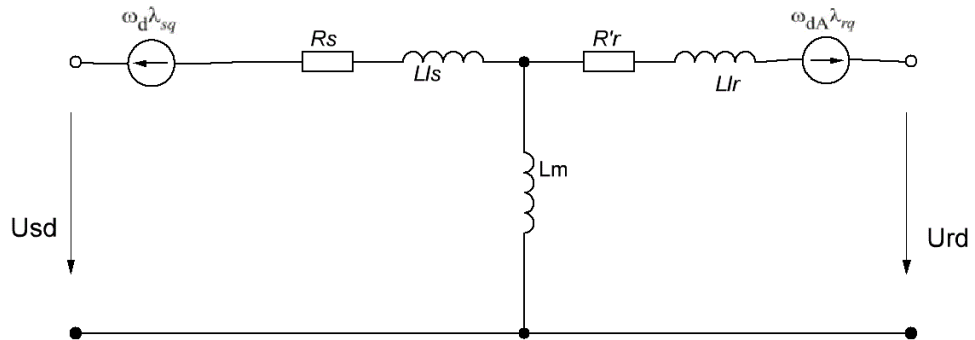


Рисунок 2.2 – Еквівалентне коло заміщення АД в проекції на d-вісь

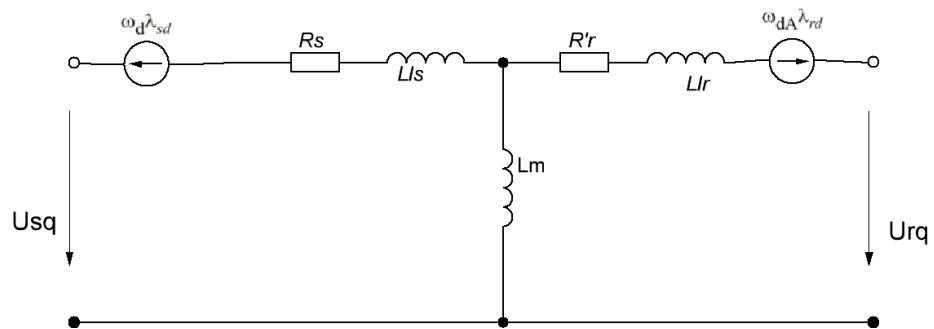


Рисунок 2.3 – Еквівалентне коло заміщення АД в проекції на q-вісь

Тут R_s – активний опір обмотки статора;

L_{ls} – індуктивність розсіювання обмотки статора;

L_{lr} – індуктивність розсіювання обмотки ротора;

L_m – взаємна індуктивність обмоток статора та ротора;

$\omega_d \lambda_{sd}$ – ЕРС індукції обмотки статора в проекції на d -вісь;

$\omega_d \lambda_{rd}$ – ЕРС індукції обмотки ротора в проекції на d -вісь;

ω_d – швидкість обертання магнітного поля;

U_{sd} – напруга на затискачах обмотки статора в проекції на d -вісь.

Необхідність керування асинхронним двигуном в різних умовах створює необхідність зворотних зв'язків в системі керування. Це означає, що вкрай важливим є розгляд перехідних процесів в колі електромеханічного перетворювача енергії. Окрім того, для більш якісного керування асинхронним двигуном необхідне поглиблене розуміння векторного керування. Вище була розглянута математична модель АД в природних координатах, яка дозволяла дослідити перехідні процеси, але система диференціальних рівнянь виявилась занадто складною для обчислення.

Для спрощення цієї системи трифазний АД може бути замінений еквівалентним двофазним. Позначимо за d^s , q^s , d^r та q^r d - та q - осі статора та ротора. Проте навіть у цій моделі залишається проблема коефіцієнтів, що змінюються у часі. Для розв'язання цієї задачі Р. Парк розробив методику перетворення. Статорні змінні приводяться до системи координат ротора, що

обертається на синхронній швидкості. Змінні у часі індуктивності, що виникають через взаємозв'язок між електричним та магнітним колами, можна прибрати завдяки перетворенням Парка [111].

Пізніше, Г. Стенлі показав, що залежні від часу індуктивності, які виникають в рівняннях напруги та струму, можна прибрати приведенням змінних до координат уявної нерухомої обмотки. В цьому випадку роторні змінні приводяться до статорних координат.

Рівняння напруг статора у нерухомій системі координат:

$$\begin{aligned} u_{sA}(t) &= R_s i_{sA}(t) + \frac{d\psi_{sA}(t)}{dt} \\ u_{sB}(t) &= R_s i_{sB}(t) + \frac{d\psi_{sB}(t)}{dt} \\ u_{sC}(t) &= R_s i_{sC}(t) + \frac{d\psi_{sC}(t)}{dt} \end{aligned}, \quad (2.17)$$

де U_{sA} – напруга фази A статора в нерухомій системі координат;

i_{sA} – струм фази A статора в нерухомій системі координат;

ψ_{sA} – потокозчеплення фази A статора в нерухомій системі координат.

Рівняння напруг ротора в обертовій системі координат:

$$\begin{aligned} u_{sa}(t) &= R_r i_{ra}(t) + \frac{d\psi_{ra}(t)}{dt} \\ u_{sb}(t) &= R_r i_{rb}(t) + \frac{d\psi_{rb}(t)}{dt} \\ u_{sc}(t) &= R_r i_{rc}(t) + \frac{d\psi_{rc}(t)}{dt} \end{aligned} \quad (2.18)$$

Тут індекси з фазами, позначеними маленькими літерами, є відповідними значеннями з великими літерами, що позначають ті ж фази, але для ротора в обертовій системі координат.

Потокозчеплення статора та ротора можуть бути визначені наступним чином:

$$\begin{aligned}
 \psi_{sA} &= \overline{L}_s i_{sA} + \overline{M}_s i_{sB} + \overline{M}_s i_{sC} + \overline{M}_{sr} \cos(\theta_m) i_{ra} + \\
 &+ \overline{M}_{sr} \cos\left(\theta_m + \frac{2\pi}{3}\right) i_{rb} + \overline{M}_{sr} \cos\left(\theta_m - \frac{2\pi}{3}\right) i_{rc} \\
 \psi_{sB} &= \overline{M}_s i_{sA} + \overline{L}_s i_{sB} + \overline{M}_s i_{sC} + \overline{M}_{sr} \cos\left(\theta_m - \frac{2\pi}{3}\right) i_{ra} + \\
 &+ \overline{M}_{sr} \cos(\theta_m) i_{rb} + \overline{M}_{sr} \cos\left(\theta_m + \frac{2\pi}{3}\right) i_{rc}
 \end{aligned} \tag{2.19}$$

$$\begin{aligned}
 \psi_{sC} &= \overline{M}_s i_{sA} + \overline{M}_s i_{sB} + \overline{L}_s i_{sC} + \overline{M}_{sr} \cos\left(\theta_m + \frac{2\pi}{3}\right) i_{ra} + \\
 &+ \overline{M}_{sr} \cos\left(\theta_m - \frac{2\pi}{3}\right) i_{rb} + \overline{M}_{sr} \cos(\theta_m) i_{rc} \\
 \psi_{ra} &= \overline{M}_{sr} \cos(-\theta_m) i_{sA} + \overline{M}_{sr} \cos\left(-\theta_m + \frac{2\pi}{3}\right) i_{sB} + \\
 &+ \overline{M}_{sr} \cos\left(-\theta_m - \frac{2\pi}{3}\right) i_{sC} + \overline{L}_r i_{ra} + \overline{M}_s i_{rb} + \overline{M}_s i_{rc} \\
 \psi_{rb} &= \overline{M}_{sr} \cos\left(-\theta_m - \frac{2\pi}{3}\right) i_{sA} + \overline{M}_{sr} \cos(-\theta_m) i_{sB} + \\
 &+ \overline{M}_{sr} \cos\left(-\theta_m + \frac{2\pi}{3}\right) i_{sC} + \overline{M}_r i_{ra} + \overline{L}_s i_{rb} + \overline{M}_s i_{rc}
 \end{aligned} \tag{2.20}$$

де $L_{s(r)a}$ – індуктивність розсіювання статорної (роторної) обмотки фази A ;

M – взаємні індуктивності статора та ротора;

$i_{s(r)a}$ – миттєві значення струму обмотки фази A статора (ротора);

θ – кут відхилення магнітного поля від початку обертових

координат.

Підставивши рівняння (2.20) в систему (2.18), після спрощень отримується наступна система, яку зручніше написати у векторно-матричній формі:

$$\begin{bmatrix} u_{sA} \\ u_{sB} \\ u_{sC} \\ u_{ra} \\ u_{rb} \\ u_{rc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s + p\bar{L}_s & p\bar{M}_s & p\bar{M}_s \\ p\bar{M}_s & R_s + p\bar{L}_s & p\bar{M}_s \\ p\bar{M}_s & p\bar{M}_s & R_s + p\bar{L}_s \\ p\bar{M}_{sr} \cos \theta_m & p\bar{M}_{sr} \cos \theta_{m1} & p\bar{M}_{sr} \cos \theta_{m2} \\ p\bar{M}_{sr} \cos \theta_{m2} & p\bar{M}_{sr} \cos \theta_m & p\bar{M}_{sr} \cos \theta_{m1} \\ p\bar{M}_{sr} \cos \theta_{m1} & p\bar{M}_{sr} \cos \theta_{m2} & p\bar{M}_{sr} \cos \theta_m \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sA} \\ i_{sB} \\ i_{sC} \\ i_{ra} \\ i_{sb} \\ i_{rc} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} R_r + p\bar{L}_r & p\bar{M}_r & p\bar{M}_r \\ p\bar{M}_r & R_r + p\bar{L}_r & p\bar{M}_r \\ p\bar{M}_r & p\bar{M}_r & R_r + p\bar{L}_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ra} \\ i_{sb} \\ i_{rc} \end{bmatrix}, \quad (2.21)$$

де p – оператор Лапласа.

Трифазні статорні та роторні рівняння напруги, записані у векторно-матричній формі (2.21) можуть бути приведені до двохфазних статорних та роторних рівнянь напруги за допомогою перетворень Парка.

Спочатку змінні в природних координатах (a_s - b_s - c_s) приводяться до нерухомих ортогональних координат (d^s - q^s). Потім отриманні змінні приводяться до обертових ортогональних координат (d^e - q^e) і навпаки. Нехай вісь q^s розташована під кутом θ до осі a . Тоді перетворення напруг можна записати у вигляді проекцій:

$$\begin{bmatrix} u_{as} \\ u_{bs} \\ u_{cs} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \sin(\theta) & 1 \\ \cos(\theta-120^\circ) & \sin(\theta-120^\circ) & 1 \\ \cos(\theta+120^\circ) & \sin(\theta+120^\circ) & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_{qs}^s \\ u_{ds}^s \\ u_{0s}^s \end{bmatrix} \quad (2.22)$$

І навпаки:

$$\begin{bmatrix} u_{qs}^s \\ u_{ds}^s \\ u_{0s}^s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta-120^\circ) & \cos(\theta+120^\circ) \\ \sin(\theta) & \sin(\theta-120^\circ) & \sin(\theta+120^\circ) \\ 0.5 & 0.5 & 0.5 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_{as} \\ u_{bs} \\ u_{cs} \end{bmatrix} \quad (2.23)$$

Верхній індекс s показує, що змінна відноситься до нерухомих ортогональних координат, його відсутність – до обертових.

Тут в якості змінної перетворювалась напруга. Таким же чином можна виконати перетворення й для струму та магнітного потоку. У випадку, коли нульова компонента u_{0s}^s дорівнює нулю, рівняння перетворення можуть бути спрощені до наступного вигляду:

$$\begin{aligned} u_{as} &= u_{qs}^s \\ u_{bs} &= \frac{1}{2} u_{qs}^s - \frac{\sqrt{3}}{2} u_{ds}^s \\ u_{cs} &= -\frac{1}{2} u_{qs}^s + \frac{\sqrt{3}}{2} u_{ds}^s \end{aligned} \quad (2.24)$$

Та зворотні перетворення:

$$\begin{aligned} u_{qs}^s &= \frac{2}{3} u_{as} - \frac{1}{3} u_{bs} - \frac{1}{3} u_{cs} = v_{as} \\ u_{ds}^s &= \frac{-1}{\sqrt{3}} u_{bs} + \frac{1}{\sqrt{3}} u_{cs} \end{aligned} \quad (2.25)$$

Обертові ортогональні координати d^e-q^e обертаються з синхронною швидкістю ω_e відносно нерухомих координат. Тоді кут $\theta = \omega_e \cdot t$. Двохфазні обмотки приводяться до уявних обмоток, що обертаються із синхронною

швидкістю. Тоді напруги в системі координат d^e-q^e можна отримати наступним чином (верхній індекс e надалі буде опускається):

$$\begin{aligned} u_{qs} &= u_{qs}^s \cos \theta_e - u_{ds}^s \sin \theta_e \\ u_{ds} &= u_{qs}^s \sin \theta_e + u_{ds}^s \cos \theta_e \end{aligned} \quad (2.26)$$

Зворотні перетворення:

$$\begin{aligned} u_{qs}^s &= u_{qs} \cos \theta_e + u_{ds} \sin \theta_e \\ u_{ds}^s &= -u_{qs} \sin \theta_e + u_{ds} \cos \theta_e \end{aligned} \quad (2.27)$$

У випадку симетричного живлення:

$$\begin{aligned} u_{as} &= U_m \cos(\omega_e t + \varphi) \\ u_{bs} &= U_m \cos\left(\omega_e t + \varphi - \frac{2\pi}{3}\right) \\ u_{cs} &= U_m \cos\left(\omega_e t + \varphi + \frac{2\pi}{3}\right) \end{aligned}, \quad (2.28)$$

де φ – початкова фаза напруги живлення.

Підставивши рівняння (2.28) у (2.25), отримується:

$$\begin{aligned} u_{qs}^s &= U_m \cos(\omega_e t + \varphi) \\ u_{ds}^s &= -U_m \sin(\omega_e t + \varphi) \end{aligned} \quad (2.29)$$

Підставивши рівняння (2.26) у (2.29), отримується:

$$\begin{aligned} u_{qs} &= U_m \cos \varphi \\ u_{ds} &= -U_m \sin \varphi \end{aligned} \quad (2.30)$$

Система (2.29) демонструє, що напруги u_{qs}^s та u_{ds}^s – збалансовані двофазні напруги з однаковою амплітудою та зсунуті одна відносно одної на 90° . Система (2.30) доводить, що синусоїдальні змінні у нерухомих ортогональних координатах мають вигляд величин постійного струму у рівномірно обертовій системі координат. Статорні змінні, при цьому, зовсім не

обов'язково (хоч і зазвичай) мають синусоїдний характер. В загальному випадку це може бути сигнал довільної форми, записаний в аналітичному вигляді. Змінні в ортогональній системі координат можна представити у вигляді комплексної функції:

$$\begin{aligned}\vec{U} &= u_{qds}^s = u_{qs}^s - ju_{ds}^s = U_m [\cos(\omega_e t + \varphi) + j \sin(\omega_e t + \varphi)] = \\ &= U_m e^{j\varphi} e^{j\omega_e t} = \sqrt{2} U_s e^{j(\theta_r(t) + \varphi)}\end{aligned}\quad (2.31)$$

Тобто, можна припустити, що вектор напруги обертається проти годинникової стрілки з частотою ω_e , починаючи від стартового кута φ до осі q^e . З рівняння (2.31) випливає, що у випадку синусоїдної напруги модуль вектора U дорівнює амплітудному значенню напруги.

Те ж саме буде і для обертових координат:

$$\begin{aligned}u_{qds}^s &= u_{qs}^s - ju_{ds}^s = \\ &= (u_{qs}^s \cos \theta_e - u_{ds}^s \sin \theta_e) - j(u_{qs}^s \sin \theta_e + u_{ds}^s \cos \theta_e) = \\ &= (u_{qs}^s - ju_{ds}^s) e^{-j\theta_e} = \vec{U} e^{-j\theta_e}\end{aligned}\quad (2.32)$$

Звідси отримується:

$$\vec{U} = u_{qs}^s - ju_{ds}^s = (u_{qs}^s - ju_{ds}^s) e^{+j\theta_e} \quad (2.33)$$

Відповідно до векторної алгебри, модулі векторів у нерухомій та обертовій системах координат будуть рівні між собою. Таким чином, рівняння (2.33) можна переписати у вигляді:

$$|\vec{U}| = U_m = \sqrt{(u_{qs}^s)^2 + (u_{ds}^s)^2} = \sqrt{(u_{qs})^2 + (u_{ds})^2} \quad (2.34)$$

Множник $e^{j\theta}$ можна розуміти як оператор обертання векторів (приймемо його як одиничний вектор), що перетворює змінні в обертових координатах в нерухомі і навпаки. $\cos \theta_e$ та $\sin \theta_e$ – декартові компоненти одиничного вектора.

Для остаточного переходу від природних координат до ортогональних підставляється рівняння (2.25) в (2.31):

$$\begin{aligned}
\vec{U} &= u_{qs}^s - j u_{ds}^s = \\
&= \left(\frac{2}{3} u_{as} - \frac{1}{3} u_{bs} - \frac{1}{3} u_{cs} \right) - j \left(-\frac{1}{\sqrt{3}} u_{bs} + \frac{1}{\sqrt{3}} u_{cs} \right) = \\
&= \frac{2}{3} \left[u_{as} + \left(-\frac{1}{2} + j \frac{\sqrt{3}}{2} \right) u_{bs} + \left(-\frac{1}{2} - j \frac{\sqrt{3}}{2} \right) u_{cs} \right] =, \\
&= \frac{2}{3} (u_{as} + a u_{bs} + a^2 u_{cs})
\end{aligned} \tag{2.35}$$

де $a = e^{j(2/3)\pi}$ – одиничний вектор повороту природних координат.

Всі наведені вище викладки для статорних змінних є аналогічними і для роторних.

2.1.3 Динамічна модель електромеханічного перетворювача енергії на базі рівнянь Крона

Для двофазного електромеханічного перетворювача енергії необхідно записувати рівняння як для електричного кола статора, так і ротора в обертових ортогональних координатах [111]. Рівняння струму статора виглядають наступним чином:

$$\begin{aligned}
u_{qs}^s &= R_s i_{qs}^s + \frac{d}{dt} \psi_{qs}^s \\
u_{ds}^s &= R_s i_{ds}^s + \frac{d}{dt} \psi_{ds}^s
\end{aligned} \tag{2.36}$$

Ці рівняння приводяться до обертової системи координат:

$$\begin{aligned}
u_{qs} &= R_s i_{qs} + \frac{d}{dt} \psi_{qs} + \omega_e \psi_{ds} \\
u_{ds} &= R_s i_{ds} + \frac{d}{dt} \psi_{ds} - \omega_e \psi_{qs}
\end{aligned} \tag{2.37}$$

Тут змінні без верхнього індексу – це змінні в обертовій системі координат. Остання складова виникає у зв'язку з обертанням осей відносно

обмоток статора. У випадку, коли швидкість обертання осей $\omega_e=0$, рівняння (2.37) набуває вигляд (2.36). Якщо є нерухомий ротор, то рівняння для нього будуть аналогічні статорним. Якщо ж ротор обертатиметься з певною швидкістю ω_r відносно статора, то зміниться лише остання складова у цих рівняннях і вони отримають наступний вигляд:

$$\begin{aligned} u_{qr} &= R_r i_{qr} + \frac{d}{dt} \psi_{qr} + (\omega_e - \omega_r) \psi_{dr} \\ u_{dr} &= R_r i_{dr} + \frac{d}{dt} \psi_{dr} - (\omega_e - \omega_r) \psi_{qr} \end{aligned} \quad (2.38)$$

Потокозчеплення статора та ротора має вигляд :

$$\begin{aligned} \psi_{qs} &= L_{ls} i_{qs} + L_m (i_{qs} + i_{qr}) \\ \psi_{qr} &= L_{lr} i_{qr} + L_m (i_{qs} + i_{qr}) \\ \psi_{qm} &= L_m (i_{qs} + i_{qr}) \\ \psi_{ds} &= L_{ls} i_{ds} + L_m (i_{ds} + i_{dr}) \\ \psi_{dr} &= L_{lr} i_{dr} + L_m (i_{ds} + i_{dr}) \\ \psi_{dm} &= L_m (i_{ds} + i_{dr}) \end{aligned} \quad (2.39)$$

Після підстановки (2.39) в системи (2.37-2.38) отримуються електричні рівняння, які представляються у матричному вигляді:

$$\begin{bmatrix} u_{qs} \\ u_{ds} \\ u_{qr} \\ u_{dr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s + sL_s & -\omega_e L_s & sL_m & -(\omega_e - \omega_r) L_m \\ -\omega_e L_s & R_s + sL_s & -\omega_e L_m & sL_m \\ sL_m & (\omega_e - \omega_r) L_m & R_r + sL_r & -(\omega_e - \omega_r) L_r \\ -(\omega_e - \omega_r) L_m & sL_m & -(\omega_e - \omega_r) L_r & R_r + sL_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{qs} \\ i_{ds} \\ i_{qr} \\ i_{dr} \end{bmatrix}, \quad (2.40)$$

або:

$$\begin{bmatrix} i_{qs} \\ i_{ds} \\ i_{qr} \\ i_{dr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s + sL & -\omega_e L_s & sL_m & -(\omega_e - \omega_r) L_m \\ -\omega_e L_s & R_s + sL_s & -\omega_e L_m & sL_m \\ sL_m & (\omega_e - \omega_r) L_m & R_r + sL_r & (\omega_e - \omega_r) L_r \\ -(\omega_e - \omega_r) L_m & sL_m & (\omega_e - \omega_r) L_r & R_r + sL_r \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} u_{qs} \\ u_{ds} \\ u_{qr} \\ u_{dr} \end{bmatrix}, \quad (2.41)$$

де s – оператор Лапласа;

ω_r – швидкість обертання ротора.

Для однофазного АД $v_{qr}=v_{ds}=0$. За умови постійної швидкості ротора $\omega_r=const$ отримується система лінійних рівнянь четвертого порядку. Задавши вхідні напруги та частоту обертання магнітного поля можна визначити чотири невідомі струми. Проте, в загальному випадку швидкість ротора не можна вважати постійною, адже вона визначається за наступним рівнянням механіки:

$$T_e = T_L + J \frac{d}{dt} \omega_r, \quad (2.42)$$

де T_L – момент навантаження на валу,

T_e – електромагнітний момент двигуна,

J – приведений до валу момент інерції двигуна,

Для отримання більш компактного вигляду системи рівнянь вона записується в комплексній формі. Перетворимо систему (2.37), помноживши друге рівняння на $-j$ та додавши його до першого:

$$\begin{aligned} u_{qs} - ju_{ds} &= R_s (i_{qs} - ji_{ds}) + \frac{d}{dt} (\psi_{qs} - j\psi_{ds}) + j\omega_e (\psi_{qs} - j\psi_{ds}) \\ u_{qds} &= R_s i_{qds} + \frac{d}{dt} \psi_{qds} + j\omega_e \psi_{qds} \end{aligned} \quad (2.43)$$

Змінні v_{qds} , i_{qds} та інші тепер є комплексними змінними або векторами. Аналогічно для рівнянь ротора:

$$u_{qdr} = R_r i_{qdr} + \frac{d}{dt} \psi_{qdr} + j(\omega_e - \omega_r) \psi_{qdr} \quad (2.44)$$

Для усталеного режиму, коли всі похідні від часу дорівнюють нулю, за певних припущень отримується наступна спрощена система:

$$\begin{aligned} u_s &= R_s I_s + j\omega_e \psi_s \\ 0 &= \frac{R_s}{r} R_r I_r + j\omega_e \psi_r \end{aligned} \quad (2.45)$$

Ця система відповідає еквівалентним колам заміщення, представленим на рис. 2.2-рис. 2.3.

Рівняння електромагнітного моменту (2.42) у векторній формі:

$$T_e = \frac{3}{2} \left(\frac{p}{2} \right) \overrightarrow{\psi_m} \times \overrightarrow{I_r} \quad (2.46)$$

Після приведення до обертової системи координат отримується:

$$T_e = \frac{3}{2} \left(\frac{p}{2} \right) (\psi_{dm} i_{qr} - \psi_{qm} i_{dr}) \quad (2.47)$$

Також момент можна виразити через інші параметри:

$$\begin{aligned} T_e &= \frac{3}{2} \left(\frac{p}{2} \right) (\psi_{dm} i_{qs} - \psi_{qm} i_{ds}) \\ T_e &= \frac{3}{2} \left(\frac{p}{2} \right) (\psi_{ds} i_{qs} - \psi_{qs} i_{ds}) \\ T_e &= \frac{3}{2} \left(\frac{p}{2} \right) L_m (i_{qs} i_{dr} - i_{qr} i_{ds}) \\ T_e &= \frac{3}{2} \left(\frac{p}{2} \right) (\psi_{dr} i_{qr} - \psi_{qr} i_{dr}) \end{aligned} \quad (2.48)$$

Рівняння (2.41), (2.42) та (2.47) складають повну математичну модель асинхронного двигуна в ортогональних координатах, що обертаються із синхронною швидкістю. Ця система рівнянь є нелінійною та має п'ятий порядок.

2.1.4 Динамічна модель електромеханічного перетворювача енергії на базі рівнянь Стенлі

Динамічну модель АД в нерухомих ортогональних координатах можна отримати шляхом підстановки в рівняння (2.41) або (2.37)-(2.38) $\omega_e = 0$ [111]. Таким чином отримується:

$$\begin{aligned} u_{qs}^s &= R_s i_{qs}^s + \frac{d}{dt} \psi_{qs}^s \\ u_{ds}^s &= R_s i_{ds}^s + \frac{d}{dt} \psi_{ds}^s \\ 0 &= R_r i_{qr}^s + \frac{d}{dt} \psi_{qr}^s - \omega_r \psi_{dr}^s \\ 0 &= R_r i_{dr}^s + \frac{d}{dt} \psi_{dr}^s - \omega_r \psi_{qr}^s \end{aligned} \quad (2.49)$$

Аналогічно для рівнянь моменту (2.46-2.48):

$$\begin{aligned} T_e &= \frac{3}{2} \left(\frac{p}{2} \right) (\psi_{dm}^s i_{qr}^s - \psi_{qm}^s i_{dr}^s) \\ T_e &= \frac{3}{2} \left(\frac{p}{2} \right) (\psi_{dm}^s i_{qs}^s - \psi_{qm}^s i_{ds}^s) \\ T_e &= \frac{3}{2} \left(\frac{p}{2} \right) (\psi_{ds}^s i_{qs}^s - \psi_{qs}^s i_{ds}^s) \\ T_e &= \frac{3}{2} \left(\frac{p}{2} \right) L_m (i_{qs}^s i_{dr}^s - i_{qr}^s i_{ds}^s) \\ T_e &= \frac{3}{2} \left(\frac{p}{2} \right) (\psi_{dr}^s i_{qr}^s - \psi_{qr}^s i_{dr}^s) \end{aligned} \quad (2.50)$$

Об'єднавши системи (2.36) та (2.49), отримується комплексна модель:

$$\begin{aligned} u_{qds}^s &= R_s i_{qds}^s + \frac{d}{dt} \psi_{qds}^s \\ 0 &= R_r i_{qdr}^s + \frac{d}{dt} \psi_{qdr}^s - j\omega_r \psi_{qdr}^s \end{aligned} \quad , \quad (2.51)$$

де $v_{qds}^s = v_{qs}^s - jv_{ds}^s$

$$\psi_{qds}^s = \psi_{qs}^s - j\psi_{ds}^s$$

$$i_{qds}^s = i_{qs}^s - ji_{ds}^s$$

$$\psi_{qdr}^s = \psi_{qr}^s - j\psi_{dr}^s$$

Подальші перетворення аналогічні перетворенням в обертовій системі координат.

2.2 Математична модель силового електронного перетворювача електричної енергії – широтно-імпульсного модулятора

В сучасних електричних колах АД живиться від силового електронного перетворювача (інвертора), який працює на основі широтно-імпульсної модуляції (ШІМ). Коло живлення асинхронного двигуна зображене на рис. 2.4.

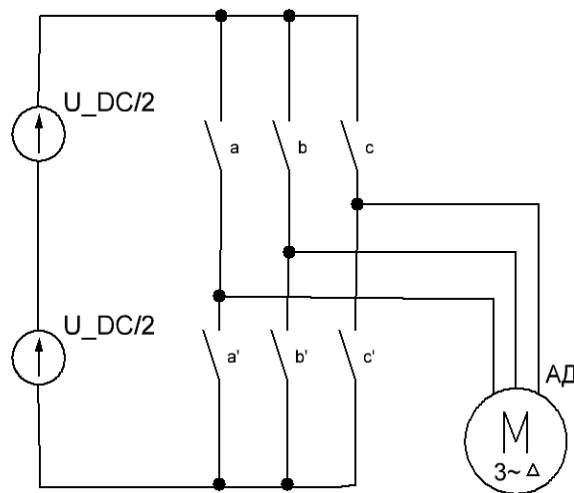


Рисунок 2.4 – Електрична схема кола живлення трифазного АД

Проблемою керування асинхронним двигуном є нелінійна математична модель високого порядку та взаємний вплив одна на одну змінних моделі по різних координатах. Для вирішення проблеми використовується векторне керування, яке забезпечує керування амплітудою та положенням вектора напруги живлення АД за допомогою ШІМ. Найзручнішою моделлю для

розрахунку такої системи є математична модель на базі обертових ортогональних d - та q - координат.

Електричне коло з однофазним інвертором з нульовою точкою показано на рис. 2.5.

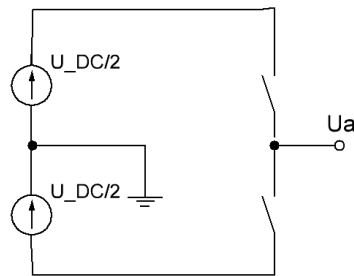


Рисунок 2.5 – Модель однофазного інвертора з нульовою точкою

Для керування ключами використовуються два сигнали: синусоїдальний U_{cont} та трикутний U_{tr} . Коли синусоїдальний сигнал буде більший за трикутний, верхній ключ буде відкритий, а нижній – закритий, коли менше – навпаки (рис. 2.6).

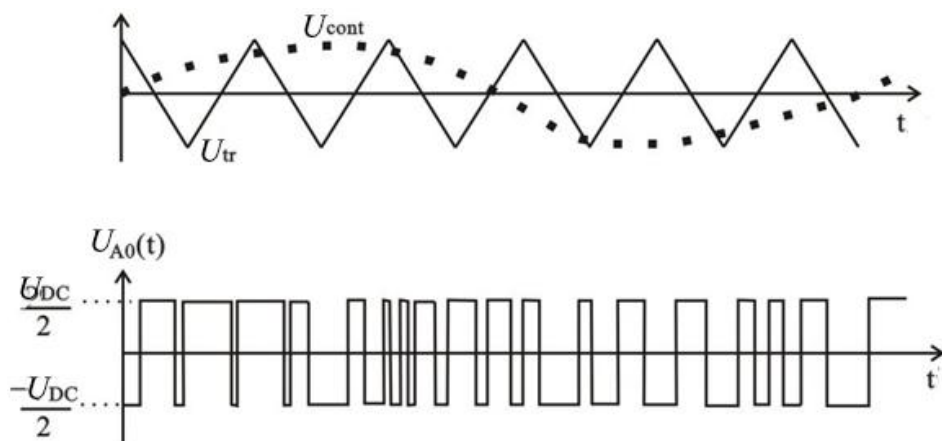


Рисунок 2.6 – Формування вихідної напруги ШІМ

Отже, вихідна напруга може бути записана наступним чином:

$$U_{AO} = U_{DC}/2, \text{ коли } U_{cont} > U_{tr};$$

$$U_{AO} = -U_{DC}/2, \text{ коли } U_{cont} < U_{tr}.$$

Властивості вихідного сигналу ШІМ:

- частота сигналів вихідної напруги співпадає з частотою трикутного сигналу керування;
- амплітуда вихідної напруги визначається джерелом живлення;
- частота першої гармоніки вихідного сигналу співпадатиме з частотою синусоїдального сигналу керування.

Розглянемо тепер трифазний інвертор з ШІМ (рис. 2.7). Тут $S_1..S_6$ – електричні ключі, що контролюються цифровими сигналами a, a', b, b', c та c' відповідно. Коли один з ключів з верхньої трійки (сигнали a, b чи c) знаходиться у відкритому стані, відповідний ключ з нижньої трійки буде закритим і навпаки. Таким чином для визначення вихідної напруги інвертора можна керуватися станами ключів S_1, S_2 та S_3 .

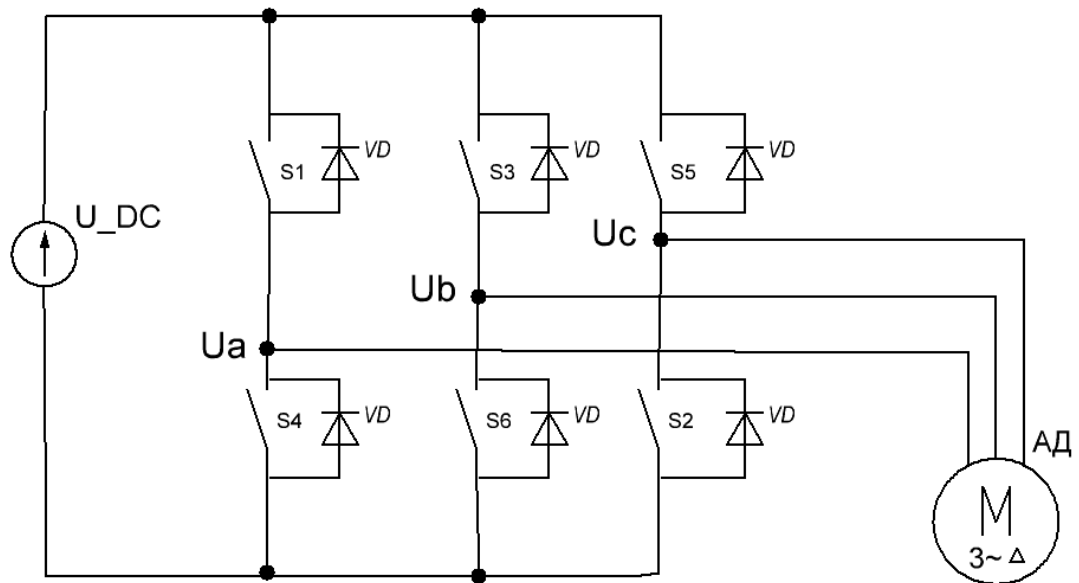


Рисунок 2.7 – Електричне коло живлення АД за допомогою трифазної ШІМ

У матричній формі вихідні лінійні та фазні напруги визначаються відносно сигналів керування наступним чином:

$$\begin{bmatrix} U_{ab} \\ U_{bc} \\ U_{ca} \end{bmatrix} = U_{DC} \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & -1 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} U_{an} \\ U_{bn} \\ U_{cn} \end{bmatrix} = \frac{U_{DC}}{3} \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & -1 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \end{bmatrix}, \quad (2.52)$$

де U_{ab} – лінійна напруга двигуна між фазами a та b ;

U_{an} – фазна напруга двигуна фази a ;

U_{DC} – напруга живлення ділянки постійного струму.

Враховуючи те, що стан нижніх ключів повністю визначається станом верхніх ключів (вони завжди протилежні), всього існує вісім можливих комбінацій для вихідної напруги. Відповідно до рівнянь (2.52) значення лінійних та фазних напруг наведені в табл. 2.1.

Таблиця 2.1 – Значення вихідних напруг інвертора.

Напруга вектори	Керуючі сигнали			Фазні напруги			Лінійні напруги	
	a	b	c	v_{an}	v_{bn}	v_{cn}	v_{ab}	v_{bc}
U_0	0	0	0	0	0	0	0	0
U_1	1	0	0	$\frac{2}{3}$	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	1	0
U_2	1	1	0	$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{3}$	$-\frac{2}{3}$	0	1
U_3	0	1	0	$-\frac{1}{3}$	$\frac{2}{3}$	$-\frac{1}{3}$	-1	1
U_4	0	1	1	$-\frac{2}{3}$	$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{3}$	-1	0
U_5	0	0	1	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	$\frac{2}{3}$	0	-1
U_6	1	0	1	$\frac{1}{3}$	$-\frac{2}{3}$	$\frac{1}{3}$	1	-1
U_7	1	1	1	0	0	0	0	0

Для застосування векторного керування необхідно значення вихідних напруг привести до ортогональних d - та q - координат (рис. 2.8).

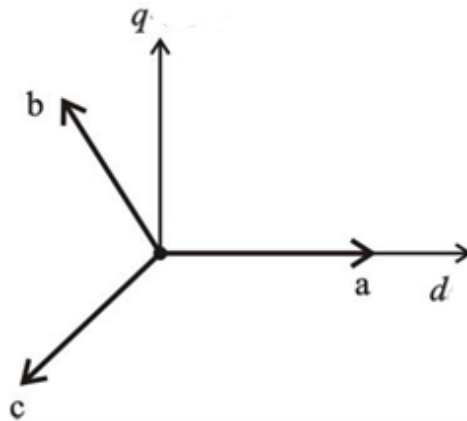


Рисунок 2.8 – Відношення між природними та ортогональними координатами

Перетворення функцій з природних у ортогональні координати:

$$f_{dq0} = K_s \cdot f_{abc} \quad , \quad (2.53),$$

де

$$K_s = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & \frac{-1}{2} & \frac{-1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{-\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix};$$

$$f_{dq0} = \begin{bmatrix} f_d \\ f_q \\ f_0 \end{bmatrix}; \quad (2.54)$$

$$f_{abc} = \begin{bmatrix} f_a \\ f_b \\ f_c \end{bmatrix}$$

Значення функції можуть містити як напругу, так і струм. З рис. 2.8 можна зробити висновок, що рівняння перетворення (2.53-2.54) є нічим іншим як ортогональними проекціями векторів $[a \ b \ c]^T$ на двовимірний ортогональний

одиничний вектор. В результаті цієї проекції отримується шість ненульових та два нульових вектори вихідної напруги (рис. 2.9).

Кут між будь-якими «сусідніми» ненульовими векторами складає 60° . Нульові вектори розташовані в початку координат.

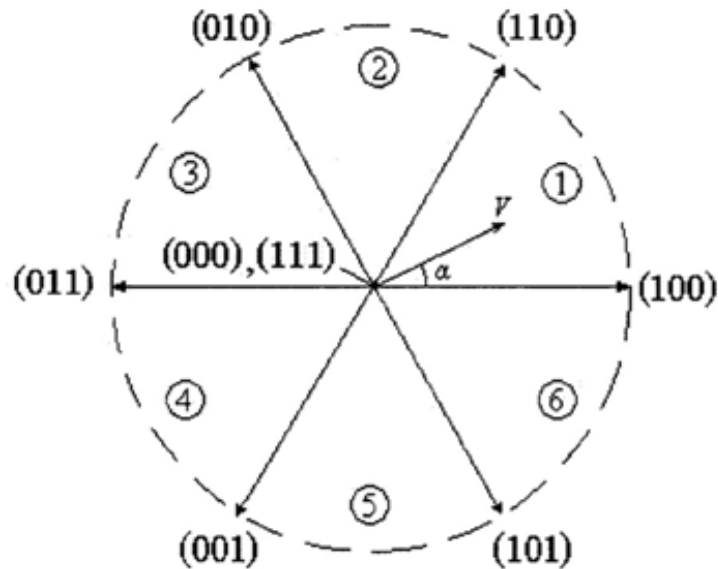


Рисунок 2.9 – Діаграма послідовності векторів вихідної напруги

Рівняння перетворення (2.56) необхідне для отримання значення бажаної напруги в ортогональних координатах. Головним завданням векторного керування є апроксимація бажаного значення напруги за допомогою восьми можливих станів перемикачів, тобто восьми можливих значень вихідної напруги. В загальному випадку, векторне керування може бути виконано у три кроки:

1. Знаходження напруг U_d , U_q , U_{ref} та кута α .
2. Визначення періодів T_1 , T_2 , та T_0 .
3. Визначення часу перемикання кожного з транзисторів.

2.3 Математична модель джерела живлення – літій-іонного акумулятора

За результатами аналізу розділу 1 зроблено висновок, що серед усіх типів автономних джерел живлення найбільш доцільно використовувати літій-іонні акумулятори, які являють собою електрохімічне джерело живлення.

Батарея складається з вуглецевого анода та катода, який є оксидом металу з домішками літію. Додатні іони літію Li^+ мігрують між катодом та анодом через електроліт. При заряді акумулятора іони літію витікають з катода і перетікають на анод, в той час як електрони рухаються в зворотному напрямку через джерело заряду. При розряді навпаки: іони літію рухаються від анода до катода, а від'ємний заряд у вигляді потоку електронів протікає крізь навантаження [75].

З точки зору електротехніки літій-іонна батарея є активним двополюсником і математична модель її зводиться до визначення функції напруги на затискачах цього двополюсника U_T від струму I та інших параметрів.

Одним з найважливіших параметрів акумуляторної батареї є її електрична ємність Q_{\max} , яка визначається як максимальна кількість електричного заряду, який батарея може віддати в навантаження від моменту її повного заряду, до максимально допустимого розряду, тобто такого, який не призводить до передчасної деградації акумуляторів. Вимірюється ця ємність в системі СІ в Кл, але найчастіше використовують позасистемну одиницю виміру $1 \text{ мА} \cdot \text{год} = 3,6 \text{ Кл}$.

Введемо поняття стану заряду батареї (state of charge, SOC), який характеризує ступінь заряду батареї.

$$SOC = Q / Q_{\max}, \quad (2.55)$$

де Q – перевищення поточного повного заряду батареї над мінімально допустимим значенням.

Обернене поняття – глибина розряду батареї (depth of discharge, DoD).

$$DOD = 1 - SOC \quad (2.56)$$

Ці величини можуть вимірюватись в одиницях або відсотках.

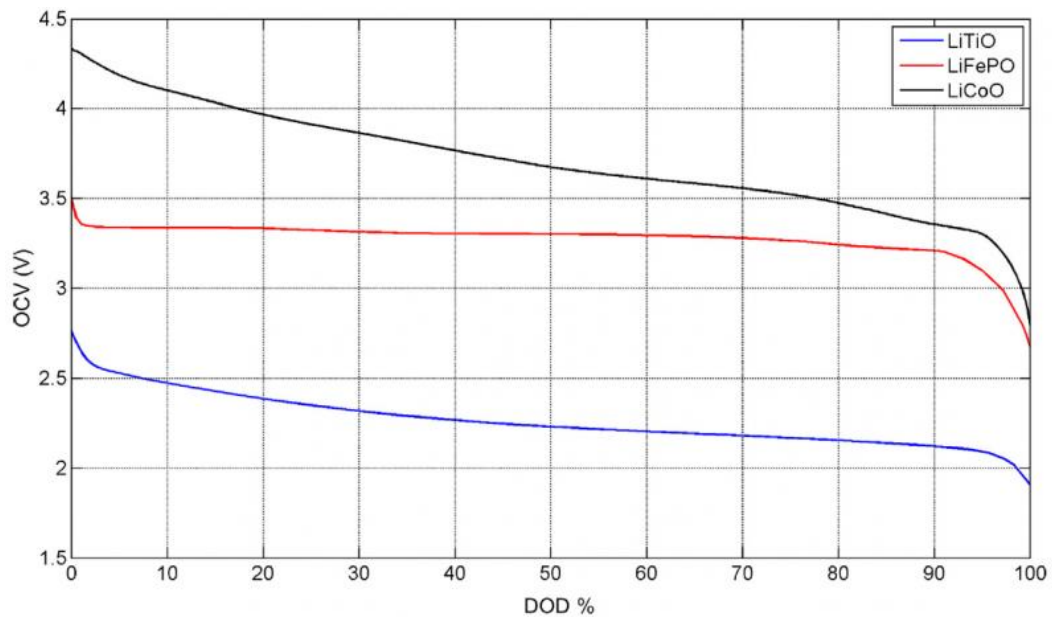


Рисунок 2.10 – Залежності напруги неробочого ходу літій-іонних акумуляторів від стану їх заряду

Напруга неробочого ходу акумулятора U_{OCV} доволі точно є однозначною функцією стану його заряду і практично не залежить від зовнішніх умов [45]. На рис. 2.10 зображені типові залежностей напруги неробочого ходу різних літій-іонних акумуляторів.

Для математичних моделей використовуються наступні апроксимації цих залежностей:

- рівняння Шеферда [55]:

$$u = E_0 - Ri - K \left(\frac{q}{Q-q} \right) i + A \left(e^{-B \frac{q}{Q}} - 1 \right) \quad (2.57)$$

- рівняння Хаскіної-Даниленко [116]:

$$u = E_0 - Ri - K \left(\frac{q}{Q-q} \right) + A \left(e^{-B \frac{q}{Q}} - 1 \right) \quad (2.58)$$

- рівняння Романова [109]:

$$u = E_0 - Ri - K \left(1 - e^{\frac{-qi}{Q-q}} \right) + A \left(e^{-\frac{Bq}{Q}} - 1 \right), \quad (2.59)$$

де E_0 – ЕРС акумулятора;

R – внутрішній опір акумулятора;

Q – максимальний заряд акумулятора;

q – повний заряд, який акумулятор віддав за час його роботи;

i – струм через акумулятор;

K, A, B – експериментальні константи.

Схема заміщення акумулятора матиме вигляд, показаний на рис. 2.11.

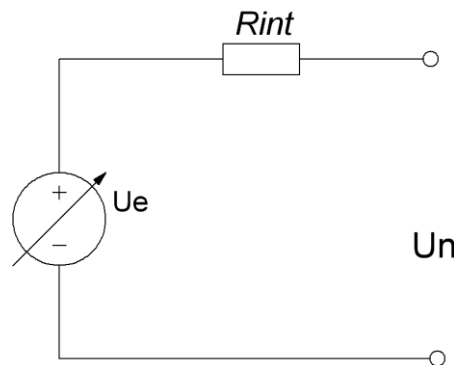


Рисунок 2.11 – Схема заміщення акумулятора

Рівняння (2.57-2.59) описують усталені електричні процеси в акумуляторі і є вихідними функціями батареї як активного двополюсника в усталених режимах. Для повного опису необхідно врахувати перехідні процеси.

Зазвичай виділяються наступні явища, які впливають на динаміку електричних перехідних процесів в батареї:

- класичний подвійний електричний шар в контакті електрод-електроліт [48];
- утворення пасивної плівки на електродах [60].

Існують багато еквівалентних схем заміщення акумуляторних батарей, які враховують перехідні процеси [19, 30, 49, 65]. На практиці найзручнішою та одночасно достатньо точною є схема заміщення з двома ємностями [75]:

- електрохімічна ємність подвійного шару C_H з малою сталою часу;
- ємність C_L , яка пов'язана з інтеркаляцією та переносом маси літію, що має високу сталу часу.

Таким чином, електрична схема заміщення акумулятора розшириться до вигляду, представленого на рис. 2.12.

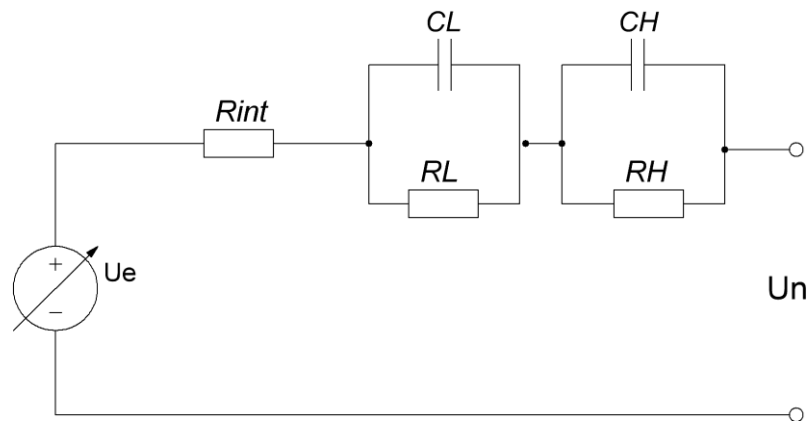


Рисунок 2.12 – Електрична схема заміщення акумулятора з урахуванням перехідних процесів

Для врахування перехідних процесів в математичній моделі акумуляторів до вираховування значень напруги в рівняннях (2.57-2.59) додаються від'ємні доданки напруг на ємностях U_H і U_L , які визначається з диференціальних рівнянь:

$$\frac{du_L}{dt} = \frac{I}{C_L} - \frac{u_L}{R_L C_L} \quad (2.60)$$

$$\frac{du_H}{dt} = \frac{I}{C_H} - \frac{u_H}{R_H C_H} \quad (2.61)$$

2.4 Математична модель суперконденсатора

За визначенням, суперконденсатор – це конденсатор з обмеженим або необмеженим електролітом, обкладинками в якому служить подвійний електричний шар на межі розділу електрода і електроліту [87]. При заряді суперконденсатора позитивно заряджені катіони рухаються до катода, а негативно заряджені аніони – до анода. Таким чином позитивні і негативні заряди накопичуються на межі розділу поверхонь обкладинок суперконденсатора і електролітичного розчину, утворюючи таким чином подвійний електричний шар. При прикладанні до суперконденсатора більш високої напруги область накопичення зарядів збільшується за рахунок проникнення зарядів в нанопори меншого діаметру. Такий процес призводить до того, що заряд у суперконденсаторі на відміну від класичних ємностей росте нелінійно відносно напруги, а саме чим більша напруга на затискачах, тим буде більша ємність суперконденсатора. [74]

Таким чином, використання для розрахунків звичайної ємності як моделі суперконденсатора є неточним. Існує багато моделей, які описують суперконденсатор з різною кількістю елементів, використаних у схемі заміщення [18, 31, 47, 70, 79, 85]. Запропонована в роботі [70] схема заміщення з достатньою для даного дослідження точністю описує електричні процеси в суперконденсаторі (рис. 2.13)

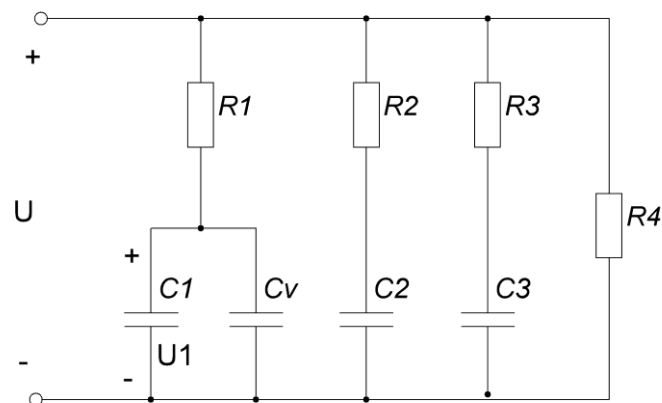


Рисунок 2.13 – Схема заміщення суперконденсатора

На цій схемі зображені три ємнісні гілки з різними сталими часу, які зростають зі збільшенням номеру індексу гілки. Ємність $C_V(U_I)$ – залежна від напруги. Функцію залежності можна прийняти за лінійну:

$$C_V = k_{CV} \cdot |U|, \quad (2.62)$$

де k_{CV} – коефіцієнт пропорційності, що визначається експериментально.

Для більшості конденсаторів стала часу першої гілки становить кілька секунд, другої гілки має порядок хвилин, а третьої гілки перевищує 10 хв. Опір R_4 є опором саморозряду суперконденсатора.

Таким чином математичну модель суперконденсатора можна представити у вигляді наступної системи диференціальних рівнянь:

$$\begin{aligned} i_C &= i_1 + i_2 + i_3 + i_4 \\ i_1 &= \left(C_1 + k_{CV} |u_C - i_1 R_1| \right) \frac{d(u_C - i_1 R_1)}{dt} \\ i_2 &= C_2 \frac{d(u_C - i_2 R_2)}{dt} \\ i_3 &= C_3 \frac{d(u_C - i_3 R_3)}{dt}, \\ i_4 &= \frac{u_C}{R_4} \end{aligned} \quad (2.63)$$

де i_i – струм i -ї гілки кола;

i_C – повний струм, що протікає через суперконденсатор.

2.5 Математична модель перетворювача енергії постійного струму

Електричне коло постійного струму може містити джерела живлення та споживачів, які мають різні номінальні значення напруг. Для узгодження їх рівня напруг виникає необхідність у використанні перетворювачів постійного

струму ППС (DC-DC перетворювачі). Існують три види таких перетворювачів – підвищуючі (boost), понижуючі (buck) та універсальні (buck-boost) (рис. 2.14).

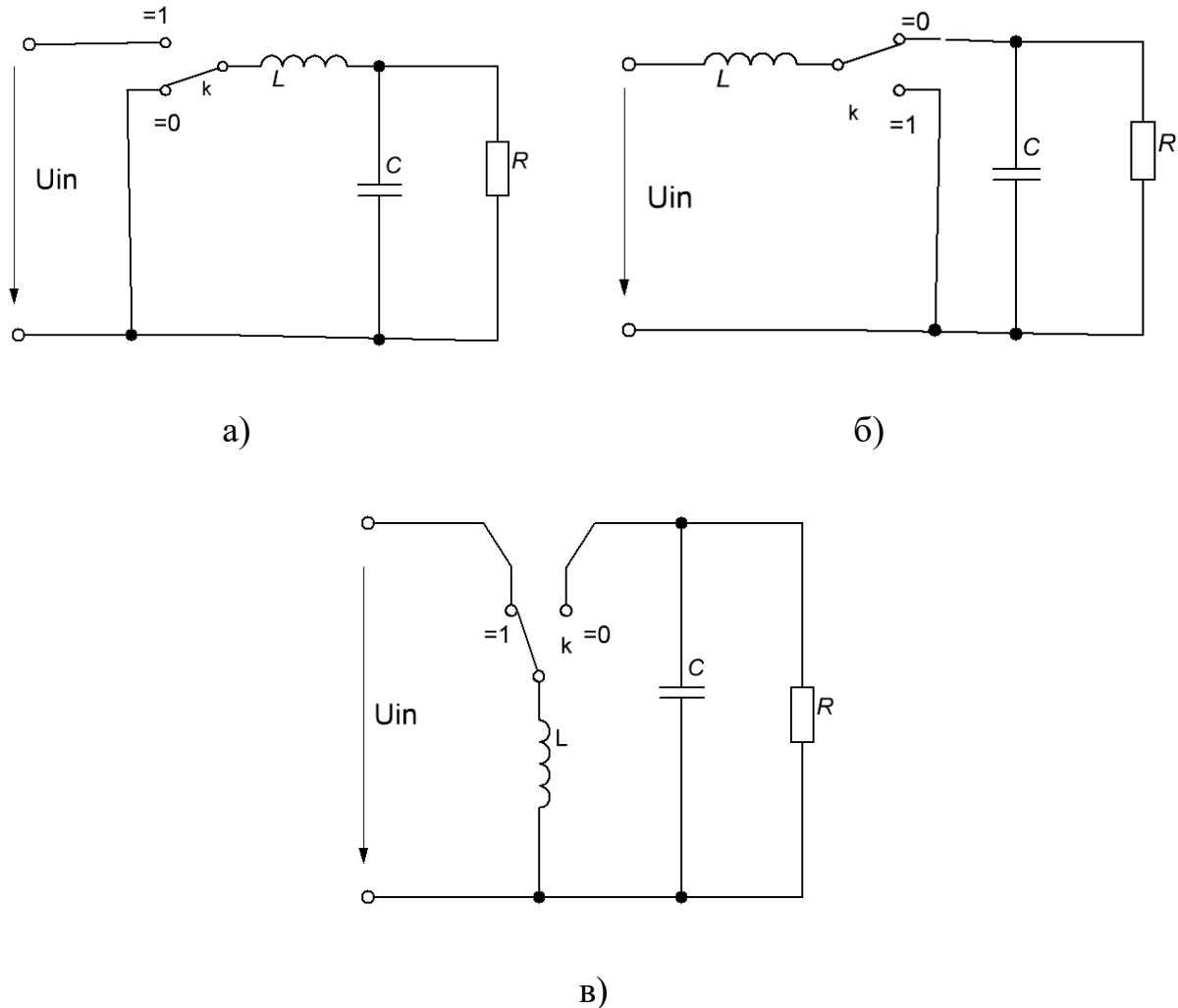


Рисунок 2.14 – Спрощені електричні кола перетворювачів постійного струму: а) понижуючий; б) підвищуючий; в) універсальний

Принцип роботи понижуючого перетворювача наступний. Коли ключ u знаходиться у положенні 1, джерело напруги V_{in} заряджає енергією котушку L , збільшуючи значення струму, що протікає крізь неї. Коли ключ u знаходиться у положенні 0, джерело не працює, а котушка L розряджається на конденсатор C , який слугує фільтром для навантаження R та підтримує на ньому постійну напругу. Керуючи імпульсами перемикання ключа можна змінювати рівень напруги конденсатора від нуля до рівня напруги джерела.

За схожим принципом працює і підвищуючі ППС. В даному випадку, коли ключ знаходиться в положенні 1, джерело заряджає котушку. Коли ключ знаходиться в положенні 0, то і джерело, і котушка заряджають конденсатор. Напруга на конденсаторі дорівнюватиме сумі напруг джерела живлення та котушки індуктивності. Керуючи імпульсами перемикання ключа можна змінювати напругу на конденсаторі від рівня напруги джерела і до значень, які дозволяють технічні властивості перетворювача.

Універсальний перетворювач від підвищуючого відрізняється тим, що коли ключ знаходиться в положенні 0, то для визначення напруги на конденсаторі до напруги котушки вже не додається напруга джерела, а значить значення напруги навантаження більше не обмежується знизу напругою джерела.

За ідеальних умов – ключ, котушка та конденсатор мають нульові опори – рівняння перетворювача можна записати в наступному вигляді.

Понижуючий перетворювач:

$$\begin{aligned} C \frac{du_C}{dt} &= i_L - \frac{u_C}{R} - i_0 \\ L \frac{di_L}{dt} &= k u_{in} - u_C \end{aligned} \quad , \quad (2.64)$$

де u_{in} – напруга джерела живлення;

u_C – напруга на конденсаторі;

i_L – струм через котушку індуктивності;

i_0 – струм навантаження;

R – опір навантаження;

C – ємність конденсатора;

L – індуктивність котушки;

k – положення ключа: $k=0$, коли ключ знаходиться в положенні 0, та $k=1$, коли ключ знаходиться в положенні 1.

Для підвищуючого перетворювача рівняння мають вигляд:

$$\begin{aligned}
C \frac{du_c}{dt} &= (1-k)i_L - \frac{u_c}{R} - i_0 \\
L \frac{di_L}{dt} &= u_{in} - (1-k)u_c
\end{aligned}
\tag{2.65}$$

Відповідно для універсального перетворювача:

$$\begin{aligned}
C \frac{du_c}{dt} &= (1-k)i_L - \frac{u_c}{R} - i_0 \\
L \frac{di_L}{dt} &= ku_{in} - (1-k)u_c
\end{aligned}
\tag{2.66}$$

Для скороченого вигляду цих рівнянь проводять їх нормалізацію. Для цього вводяться наступні коефіцієнти перетворювача:

$$\begin{aligned}
x_1 &= \frac{u_c}{u_{in}} \\
x_2 &= \frac{i_L}{u_{in}} \sqrt{\frac{L}{C}} \\
\tau &= \frac{t}{\sqrt{LC}} \\
\gamma &= \frac{\sqrt{LC}}{R} \\
d &= \frac{i_0}{u_{in}} \sqrt{\frac{L}{C}}
\end{aligned}
\tag{2.67}$$

Підставивши (2.67) у (2.64-2.66), отримуються нормалізовані рівняння перетворювачів:

Понижуючий:

$$\begin{aligned}
\dot{x}_1 &= -\gamma x_1 + x_2 - d \\
\dot{x}_2 &= -x_1 + k
\end{aligned}
\tag{2.68}$$

Тут крапка над параметрами означає їх похідну за часом, при чому одиниці виміру часу переводяться у відносні одиниці по відношенню до τ (2.67).

Підвищуючий:

$$\begin{aligned}\dot{x}_1 &= -\gamma x_1 + (1-k)x_2 - d \\ \dot{x}_2 &= -(1-k)x_1 + 1\end{aligned}\quad (2.69)$$

Універсальний:

$$\begin{aligned}\dot{x}_1 &= -\gamma x_1 + (1-k)x_2 - d \\ \dot{x}_2 &= -(1-k)x_1 + k\end{aligned}\quad (2.70)$$

Якщо ж враховувати внутрішні опори пасивних елементів перетворювача, то рівняння (2.64) для понижуючого перетворювача набудуть наступного вигляду:

$$\begin{aligned}C \frac{du_c}{dt} &= i_L - \frac{u_o}{R} - i_0 \\ u_o &= u_c + R_c C \frac{du_c}{dt} \\ L \frac{di_L}{dt} &= ku_{in} - u_o - R_L i_L,\end{aligned}\quad (2.71)$$

де R_c – активний опір конденсатора;

R_L – активний опір котушки індуктивності;

u_o – напруга на навантаженні.

Підставивши друге рівняння системи в перше та третє, отримується:

$$\begin{aligned}C \frac{du_c}{dt} &= i_L - \frac{u_c}{R} - \frac{R_c}{R} C \frac{du_c}{dt} - i_0 \\ \left(1 + \frac{R_c}{R}\right) C \frac{du_c}{dt} &= i_L - \frac{u_c}{R} - i_0 \\ u_o &= \frac{Ru_c}{R + R_c} + \frac{RR_c}{R + R_c} (i_L - i_0)\end{aligned}\quad (2.72)$$

Тоді остаточні рівняння моделі понижуючого ППС матимуть вигляд:

$$\begin{aligned}
C \frac{du_C}{dt} &= \frac{R}{R + R_C} \left(i_L - \frac{u_C}{R} - i_0 \right) \\
L \frac{di_L}{dt} &= ku_{in} - \frac{Ru_C}{R + R_C} - \left(R_L + \frac{RR_C}{R + R_C} \right) i_L + \frac{RR_C i_0}{R + R_C} \\
u_0 &= \frac{Ru_C}{R + R_C} + \frac{RR_C}{R + R_C} (i_L - i_0)
\end{aligned} \tag{2.73}$$

Аналогічно, підвищуючий ППС:

$$\begin{aligned}
C \frac{du_C}{dt} &= (1 - k) i_L - \frac{u_o}{R} - i_0 \\
L \frac{di_L}{dt} &= u_{in} - (1 - k) u_0 - R_L i_L \\
u_0 &= \frac{Ru_C}{R + R_C} + \frac{RR_C}{R + R_C} ((1 - k) i_L - i_0)
\end{aligned} \tag{2.74}$$

Та універсальний:

$$\begin{aligned}
C \frac{du_C}{dt} &= (1 - k) i_L - \frac{u_o}{R} - i_0 \\
L \frac{di_L}{dt} &= ku_{in} - (1 - k) u_0 - R_L i_L \\
u_0 &= \frac{Ru_C}{R + R_C} + \frac{RR_C}{R + R_C} ((1 - k) i_L - i_0)
\end{aligned} \tag{2.75}$$

2.6 Комп'ютерна модель нелінійного електричного кола зі змінним навантаженням

На підставі розглянутих математичних моделей асинхронного двигуна як вибраного електромеханічного перетворювача енергії можна зробити висновок, що для покращення ефективності перетворення електромагнітної енергії в колі необхідно керувати перетворювачем. Тому доцільно

застосовувати більш зручну для розрахунків модель асинхронного двигуна в ортогональній системі координат.

При розгляді моделей акумулятора та суперконденсатора загальна складність математичної моделі нелінійного електричного кола з автономним живленням значно зростає за рахунок врахування електричних перехідних процесів в цих елементах. Електромагнітні процеси, для яких буде проводитись дослідження даного кола, матимуть тривалість від десятків секунд до кількох хвилин, тому в залежності від випадку деякими диференціалами в системах можна буде знехтувати. Тим не менше, загальна складність системи унеможливорює її аналітичний розв'язок та призводить до необхідності чисельного її розв'язку та комп'ютерного моделювання.

Комп'ютерна модель нелінійного електричного кола з автономним електромеханічним перетворювачем, яка відповідає наведеним у розділі диференціальним рівнянням, створена в програмному пакеті Matlab/Simulink (рис. 2.15).

На рисунку позначено:

- 1 – літій-іонний акумулятор;
- 2 – асинхронний двигун (АД) з короткозамкненим ротором;
- 3 – блок завдання постійного моменту навантаження (сила тертя кочення);
- 4 – схема обчислення моменту опору, пропорційного до квадрату швидкості (сила опору повітря);
- 5 – батарея суперконденсаторів (може бути відключена);
- 6 – електронний силовий перетворювач на базі IGBT-транзисторів;
- 7 – блок векторного керування перетворювачем;
- 8 – блоки завдання швидкості та магнітного потоку для векторного керування;
- 9 – модель для врахування магнітних втрат в АД;
- 10 – блок обчислення магнітних втрат в АД;
- 11 – ємнісний фільтр перетворювача з боку джерела.

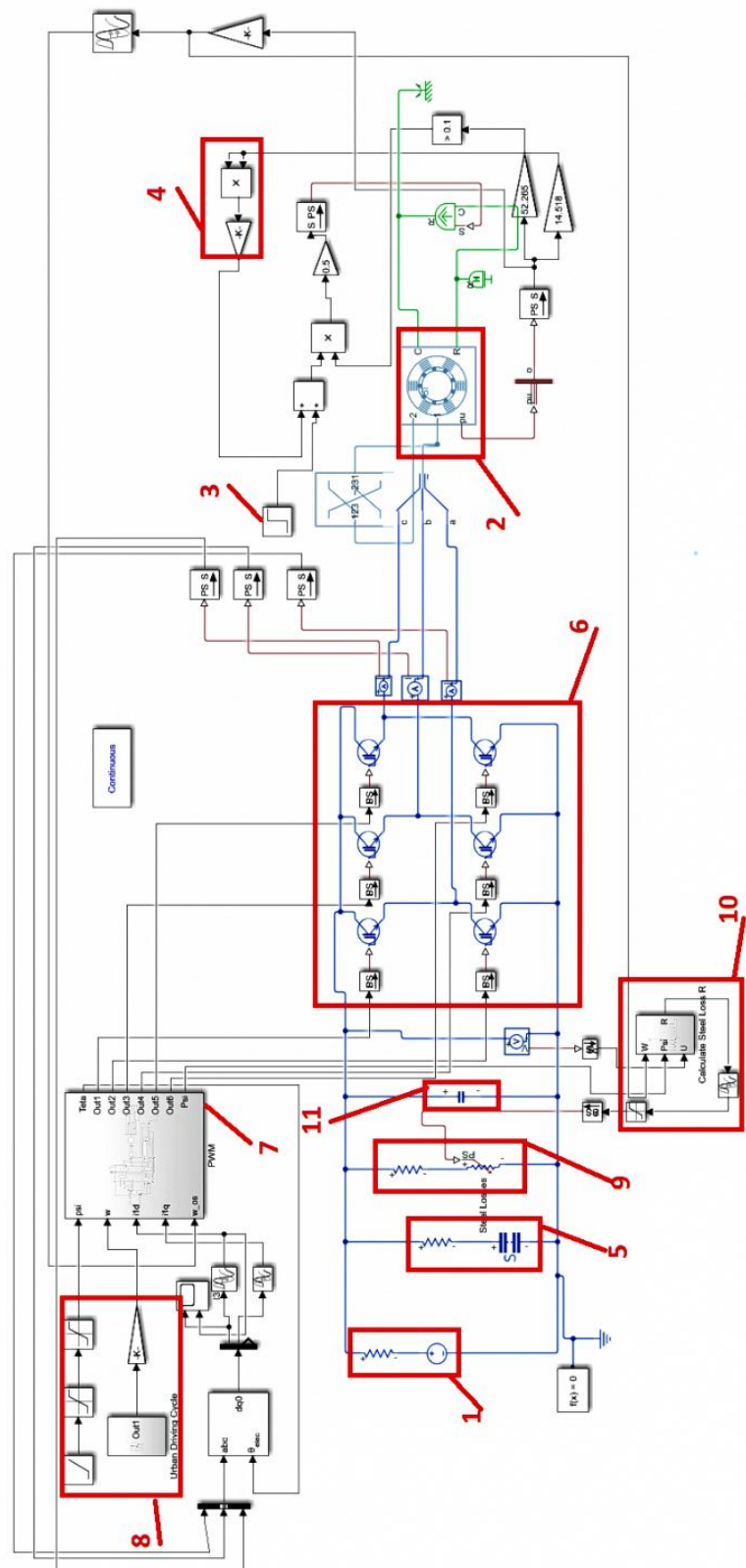


Рисунок 2.15 – Комп’ютерна модель нелінійного електричного кола з електромеханічним перетворювачем енергії (ця сторінка буде надрукована з окремого файлу).

2.7 Висновки до розділу

1. Основою математичної моделі електромеханічного перетворювача енергії є модель асинхронного двигуна в нерухомих ортогональних координатах. Модель двигуна є недостатньо точною, оскільки не враховує магнітні втрати. Для врахування цих втрат електричне коло доповнено нелінійним резистором, що підключається паралельно до перетворювача або до джерела живлення на напругу, яка надходить до двигуна. Параметри нелінійного резистора визначаються на основі значень амплітуди та частоти напруги живлення електродвигуна, від яких залежать магнітні втрати.

2. У математичній моделі силового електронного перетворювача електричної енергії (інвертора) з широтно-імпульсною модуляцією та системою векторного керування вектора напруги живлення електродвигуна вхідними змінними системи векторного керування є сигнали завдання частоти обертання ротора двигуна та величини магнітного потоку.

3. Вплив більшості нелінійних параметрів моделі літій-іонного акумулятора проявляється через проміжки часу, які довші за час перехідних процесів. Отже для спрощення загальної математичної моделі електричного кола можна знехтувати без відчутної втрати точності нелінійностями акумулятора та використовувати у якості його моделі послідовне з'єднання ідеального джерела ЕРС та резистора, величина якого дорівнюватиме внутрішньому опору акумулятора.

4. Математичною моделлю суперконденсатора є три паралельні RC-контури, один з яких містить нелінійну ємність, паралельно до яких підключений резистор. Інші два ємнісні контури мають достатньо великі сталі часу, тому суттєво не впливають на процеси в колі. Ємності є лінійними, тому не ускладнюють загальну математичну модель і не потребують спрощення.

5. Математична модель перетворювача енергії постійного струму для загальної моделі нелінійного електричного кола ускладнена шляхом

урахуванням внутрішніх опорів елементів, оскільки вони мають значний вплив на енергоефективність кола.

Отримана модель нелінійного електричного кола зі змінним навантаженням, що складається з вищенаведених математичних моделей елементів цього кола, є достатньо точною для проведення енергетичних розрахунків. У зв'язку з наявністю ряду нелінійних елементів та загальною складністю моделі для її розрахунку використовується числовий метод розрахунку комп'ютерної моделі.

РОЗДІЛ 3

ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ПЕРЕТВОРЕННЯ ЕНЕРГІЇ В НЕЛІНІЙНОМУ ЕЛЕКТРИЧНОМУ КОЛІ ЗІ ЗМІННИМ НАВАНТАЖЕННЯМ

3.1 Вибір та розрахунок параметрів елементів нелінійного електричного кола

Дослідження енергоефективності перетворення енергії здійснюється на прикладі нелінійного електричного кола електроскутера. Електроскутери мають великий потенціал на ринку особистого міського транспорту, оскільки є зручнішими та дешевшими, ніж електромобілі, а також значно тихішими та більш екологічними, ніж скутери на двигунах внутрішнього згорання (рис. 3.1). Ці транспортні засоби є малодослідженими і покращення ефективності перетворення енергії в них є актуальним полем для досліджень.



Рисунок 3.1 – Електроскутер

Дослідження проводяться на основі створеної комп'ютерної моделі нелінійного електричного кола електроскутера моделі Genata Gtle 250 (рис. 3.1). Його основні характеристики:

- максимальна швидкість – 55 км/год;
- максимальна дистанція, яку можна проїхати без підзарядки аккумулятора – 80 км при швидкості 30 км/год;
- маса – 45 кг;
- максимальне навантаження – 150 кг.

Режим роботи електромеханічного перетворювача електричного кола скутера визначається міським їздовим циклом, характерною особливістю якого є велика кількість розгонів та сповільнень. Це обумовлює значну долю перехідних процесів в роботі нелінійного електричного кола. Для дослідження обрано європейський міський цикл The UN/ECE Elementary Urban Cycle, який є стандартом при дослідженні ефективності транспортних засобів в країнах Євросоюзу [37]. Їздовий цикл представлено у вигляді діаграми залежності швидкості руху транспортного засобу від часу (рис. 3.2).

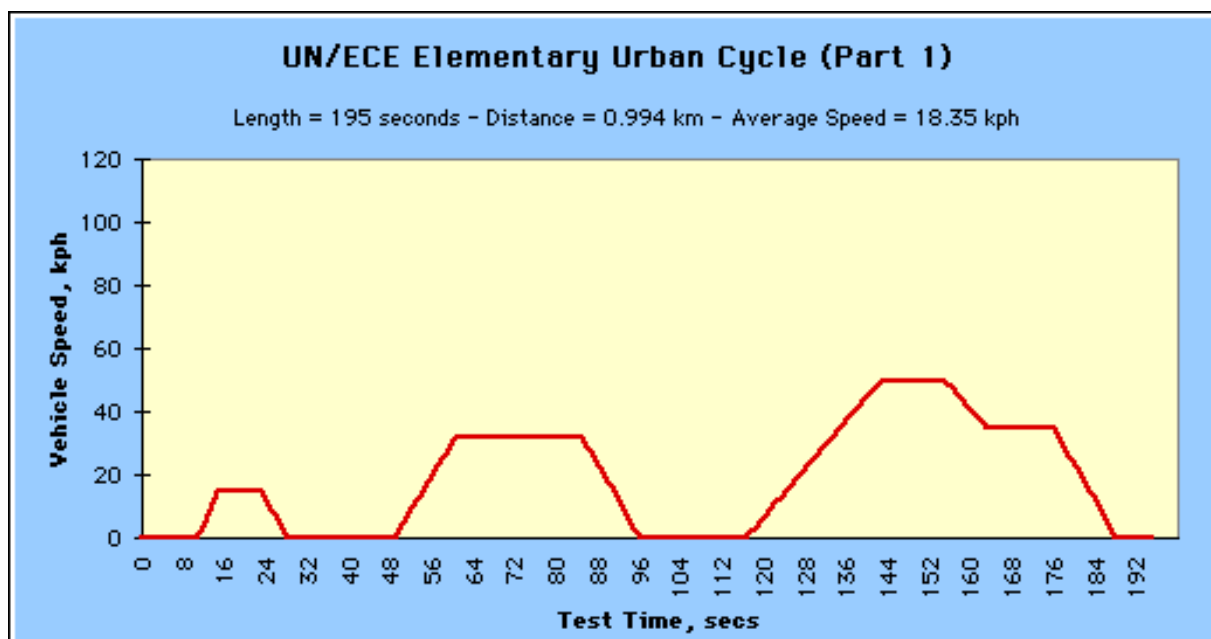


Рисунок 3.2 – Міський їздовий цикл The UN/ECE Elementary Urban Cycle

Як було визначено, перспективним електромеханічним перетворювачем у розглядуваній системі є асинхронний двигун. Важливим є розрахунок номінальної електричної потужності АД, необхідної для роботи електроскутера.

Для транспортних засобів корисним навантаженням є сила тертя, яку долає транспорт під час руху. Вона складається із сили тертя кочення, що діє на шини коліс, та сили опору повітря.

Сила тертя кочення, Н:

$$F_{m.} = \mu \cdot m \cdot g \cdot \cos \alpha = 0.015 \cdot (45 + 150) \cdot 9.8 \cdot 1 = 28.67 \text{ Н}, \quad (3.1)$$

де $m=45+150$ кг – маса транспортного засобу з максимальним навантаженням;

$g=9,8 \text{ м/с}^2$ – прискорення вільного падіння;

$\mu=0,015$ – коефіцієнт тертя повністю накачаних шин по асфальту;

$\alpha=0$ – кут нахилу поверхні до горизонту.

Сила опору повітря, Н:

$$F_{on.} = c_x \cdot s \cdot \rho \cdot (v + v_e)^2 / 2 = 1.0 \cdot 0.5 \cdot 1.29 \cdot v^2 / 2 = 0.3225 \cdot v^2, \quad (3.2)$$

де $c_x=1,0$ – коефіцієнт аеродинамічного опору для водія;

$s=0,5 \text{ м}^2$ – площа перетину лобової поверхні водія;

$\rho=1,29 \text{ кг/м}^3$ – густина повітря за нормальних умов;

v – швидкість транспортного засобу, м/с.

З викладеного випливає, що сила опору повітря, а відповідно і момент навантаження електромеханічного перетворювача має квадратичну залежність від швидкості руху транспортного засобу. Окрім того, при старті навантаження зростає у зв'язку із дією сили опору спокою. Таким чином, залежність навантаження від швидкості руху повністю завантаженого транспортного засобу при русі рівною дорогою має вигляд, представлений на рис. 3.3.

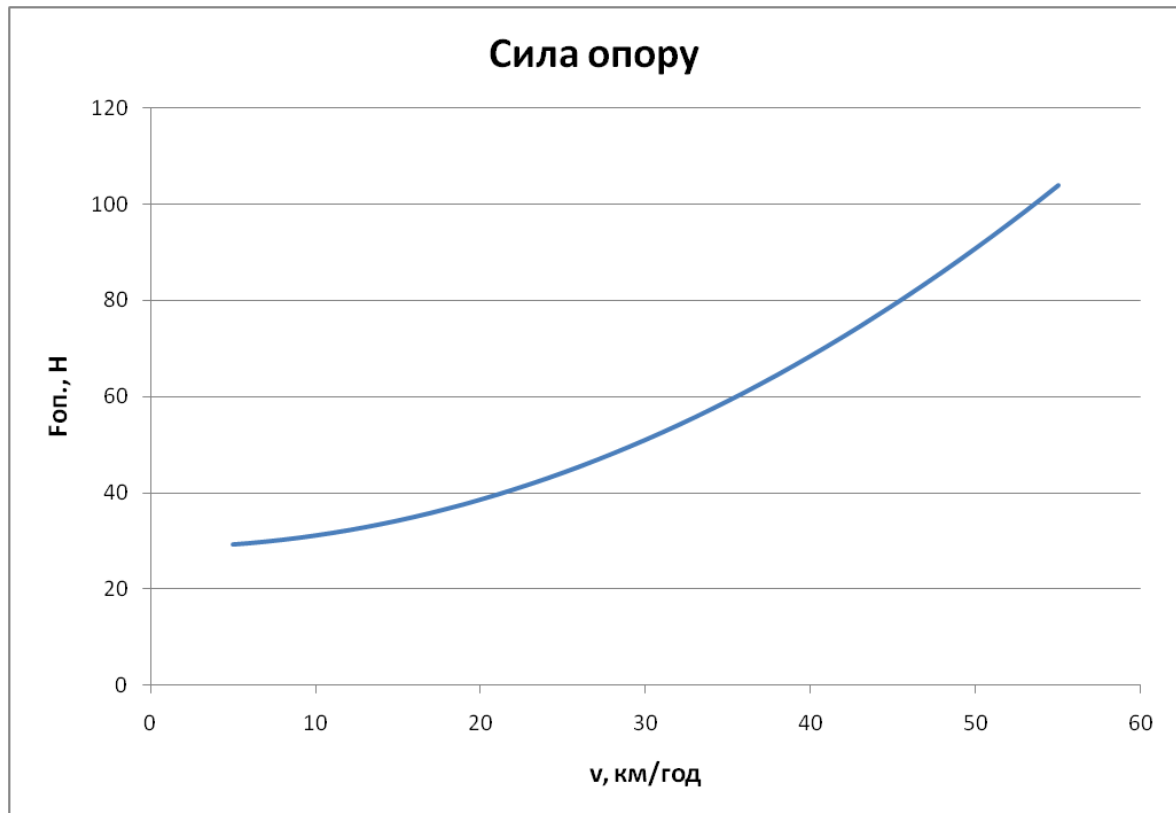


Рисунок 3.3— Залежність навантаження від швидкості руху повністю завантаженого електроскутера по рівній дорозі

Для розрахунку необхідної потужності двигуна потрібна навантажувальна характеристика у вигляді залежності потужності від часу.

Миттєва потужність визначається за формулою:

$$\begin{aligned}
 P &= P_{cm} + P_{\partial} \\
 P_{cm} &= F_{on} \cdot v \\
 P_{\partial} &= m \cdot \frac{dv}{dt} \quad , \quad (3.3)
 \end{aligned}$$

де P – миттєва потужність двигуна;

P_{cm} – статична потужність двигуна, яка іде на подолання сили опору електроскутеру;

P_{∂} – динамічна потужність двигуна, яка іде на розгін електроскутера чи його гальмування (у другому випадку вона буде від’ємною);

F_{on} – сила опору електроскутеру, що визначається за формулами (3.1-3.2);

$m=45+150$ кг – маса електроскутера з максимальним навантаженням.

За допомогою формул (3.3) із міського їздового циклу визначається навантажувальна характеристика (рис. 3.4). Міський їздовий цикл задає у якості вхідних даних залежність швидкості руху електроскутера від часу. Підставивши цю залежність у рівняння (3.3) отримуємо залежність корисної потужності від часу.



Рисунок 3.4 – Навантажувальна характеристика нелінійного електричного кола

Із цієї характеристики визначається:

- середньоквадратична корисна потужність за цикл $P_{ef.} = 713,7 \text{ Вт}$;
- максимальна миттєва корисна потужність $P_{\text{макс}} = 2682,2 \text{ Вт}$.

Прийнявши коефіцієнт перевантаження за потужністю рівним 1,2, потужність електромеханічного перетворювача енергії приблизно дорівнює 2235 Вт. Для застосування в даному електричному колі вибирається два асинхронні двигуни з короткозамкненим ротором, що працюватимуть паралельно.

Основні паспортні дані двигуна:

- Номінальна частота обертання: 2870 об/хв ;
- Механічна потужність на валу: $1,1 \text{ кВт}$;
- ККД: $80,6\%$;
- $\cos\varphi$: $0,8$;
- Номінальна напруга: $230/400 \text{ В}$;
- Номінальний струм: $4,1/2,4 \text{ А}$;
- Номінальна електрична потужність: $1,3 \text{ кВА}$.

Перевірочний розрахунок даного двигуна з метою визначити параметри його заступної схеми наведений в додатку А.

В якості силового електронного перетворювача електричної енергії DC/AC вибраний трифазний інвертор на IGBT-транзисторах зі з'єднанням за схемою Ларіонова (рис. 3.5).

В якості вентилів обираються IGBT-транзистори з номінальним струмом $I_F = 5 \text{ А}$, номінальною зворотною напругою $U_{DRM} = 600 \text{ В}$.

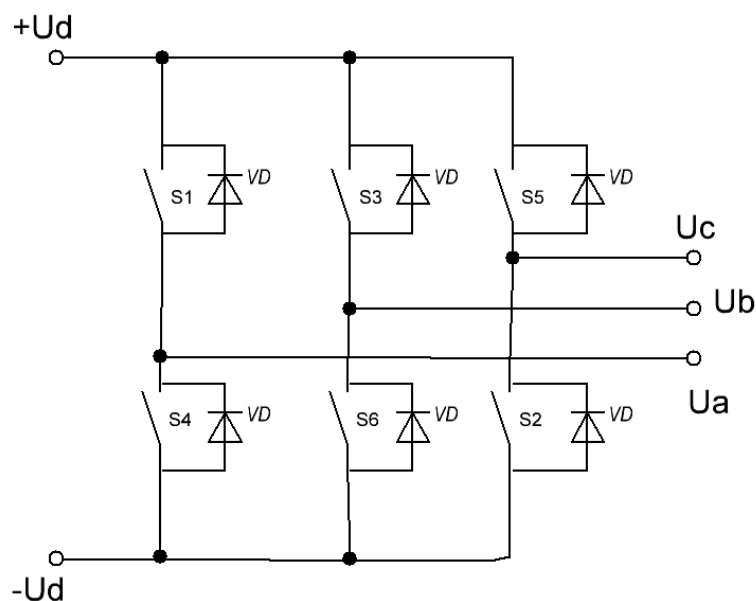


Рисунок 3.5 – Схема перетворювача електричної енергії, складеного за схемою Ларіонова

Напруга акумуляторної батареї для живлення електричного кола дорівнює:

$$U_{ак} = \frac{k_r U_{2л}}{k_u} = \frac{1,2 \cdot 230}{0,74} = 373 В \quad , \quad (3.4)$$

де $U_{2л} = 230$ Вт – номінальна лінійна напруга асинхронного двигуна;

$k_r = 1,2$ – коефіцієнт, що враховує падіння напруги на опорах батареї та перетворювача;

$k_u = 0,74$ – коефіцієнт кратності напруг перетворювача за схемою Ларіонова.

Для проходження максимальної відстані 80 км в «економічному» режимі роботи, за якого для оціночних розрахунків можна вважати споживається третина номінальної потужності, на один двигун необхідна наступна енергія [103]:

$$W = \frac{P_{2ек}}{2 \cdot \eta} \cdot t = \frac{P_{2ек}}{2 \cdot \eta} \cdot \frac{S}{v_{ек}} = \frac{425}{2 \cdot 0,806} \cdot \frac{80}{30} = 703 Вм \cdot год \quad , \quad (3.5)$$

де $P_{2ек} = v_{ек} \cdot (F_m + F_{он.30}) = 425$ Вт – потужність кола в економічному режимі роботи;

$\eta = 0,806$ – ККД двигуна;

$S = 80$ км – необхідна відстань;

$V_{ек.} = 30$ км/год – швидкість, при якій досягається максимальна відстань;

$F_{он.30} = 0,3225 \cdot v^2 = 31,4$ Н – сила опору повітря при швидкості 30 км/год.

Отже, необхідна ємність однієї батареї акумуляторів становить:

$$Q = \frac{W}{U_{ак}} = \frac{703}{373} = 1,88 А \cdot год \quad (3.6)$$

Для живлення електричного кола, враховуючи високі вимоги з питомої енергії, енергоефективності та низького внутрішнього опору, вибрано батарею

літій-іонних акумуляторів марки Hioncell HCP603650NZC з наступними параметрами:

- напруга – 3,7 В;
- ємність – 1,9 А·год;
- внутрішній опір – 0,13 Ом;
- маса – 21 г.

Для встановлення вище припущеної напруги в 373 В необхідна буде батарея із 100 таких акумуляторів, з'єднаних послідовно. Уточнене значення ЕРС акумулятора:

$$E = U_{1n} + I_{1n} \cdot r_{ак.} = 311 + 4.95 \cdot 13 = 375 \text{ В} , \quad (3.7)$$

де $U_{1n} = U_{2k}/k_u = 311 \text{ В}$ – напруга на вході транзисторного перетворювача в номінальному режимі роботи;

$I_{1n} = I_{2k}/k_i = 4,95 \text{ А}$ – струм через джерело живлення в номінальному режимі роботи.

Для встановлення необхідної напруги складається батарея із 100 таких акумуляторів, з'єднаних послідовно. Характеристики акумуляторної батареї:

- напруга – 370 В;
- ємність – 1,9 А·год;
- внутрішній опір – 13 Ом;
- маса – 2,1 кг.

Розрахунок необхідної ємності батареї суперконденсаторів проводиться із допущення, що при повному розгоні електроскутера енергія батареї суперконденсаторів переходить в кінетичну енергію електроскутера та водія, при цьому напруга на акумуляторі має впасти до значення, не меншого ніж різниця ($U_p - \Delta U$), де U_p – напруга на двигуні в номінальному режимі роботи (з урахуванням падіння напруги на внутрішньому опорі акумулятора), ΔU – допустиме тимчасове «просідання» напруги [41].

Виходячи із закону збереження енергії:

$$\begin{aligned}
 \eta \cdot \left(\frac{2c \cdot U_1^2}{2} - \frac{2c \cdot U_2^2}{2} \right) &= \frac{m \cdot v^2}{2} \\
 c &= \frac{m \cdot v^2}{2 \cdot \eta \cdot (U_1^2 - U_2^2)} = \frac{m \cdot v^2}{2 \cdot \eta \cdot (E^2 - (U_{1н} - \Delta U)^2)} = \\
 &= \frac{195 \cdot 15.2^2}{2 \cdot 0.806 \cdot (370^2 - (311 - 5)^2)} = 0.65 \text{ Ф} \quad , \quad (3.8)
 \end{aligned}$$

де $\eta = 0,806$ – ККД двигуна;

$m = 45 + 150 = 195$ кг – маса електроскутера з максимальним навантаженням;

$v = 55$ км/год = 15 м/с – максимальна швидкість електроскутера;

$\Delta U = 5$ В – допустиме тимчасове «просідання» напруги.

Для досліджень використовуватимуться різні ємності від $0,5$ Ф до 2 Ф. Для отримання таких ємностей складатимуться батареї зі 138-ми послідовно з'єднаних конденсаторів наступних видів:

а) Nesscap ESHSR-0100C0-002R7:

- номінальна напруга – $2,7$ В;
- ємність – 100 Ф;
- внутрішній опір – 8 мОм;
- маса – 21 г.

б) Nesscap ESHSR-0050C0-002R7:

- номінальна напруга – $2,7$ В;
- ємність – 50 Ф;
- внутрішній опір – 10 мОм;
- маса – $11,3$ г.

в) Nesscap ESHSR-0025C0-002R7:

- номінальна напруга – $2,7$ В;
- ємність – 25 Ф;
- внутрішній опір – 15 мОм;
- маса – $6,5$ г.

3.2 Схеми нелінійного електричного кола з регульованим електромеханічним перетворювачем

Електрична схема електроскутера зображена на рис. 3.6. На ній показано:

Асс – акумуляторна батарея;

SC – батарея суперконденсаторів;

C0 – конденсатор, який використовується у якості фільтра з боку джерела;

ШІМ – інвертор з ШІМ, який перетворює постійну напругу в трифазну змінну за законом векторного керування;

АД – асинхронний двигун з короткозамкненим ротором.

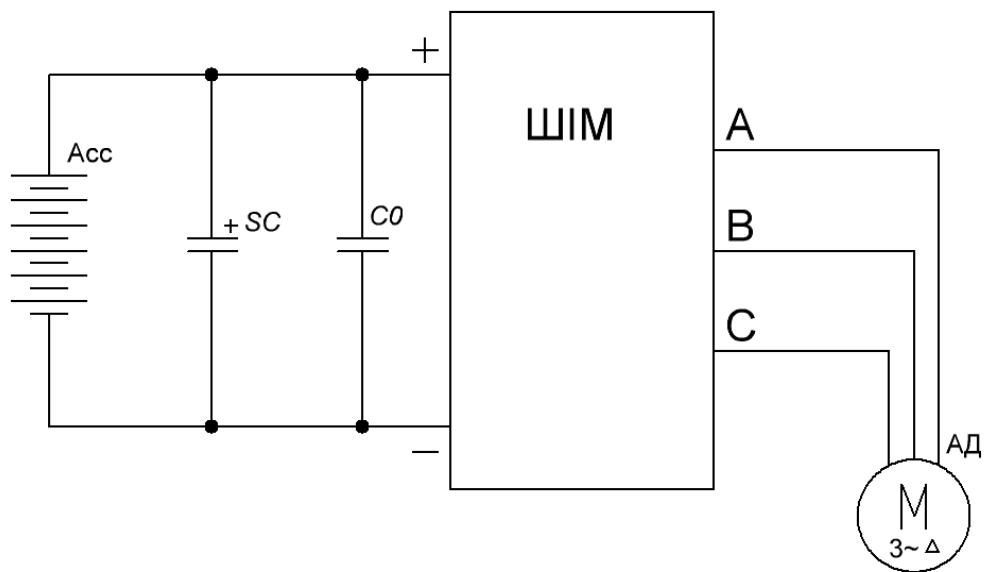


Рисунок 3.6 – Електрична схема електроскутера

На підставі її та математичних моделей, наведених в розділі 2, складається спрощена заступна схема електричного кола скутера, що представлена на рис. 3.7. На ній показано:

1 – модель акумуляторної батареї;

2 – модель батареї суперконденсаторів;

3 – однофазна схема заміщення асинхронного двигуна;

R_n – опір навантаження, величина якого залежить від механічного навантаження на валу двигуна.

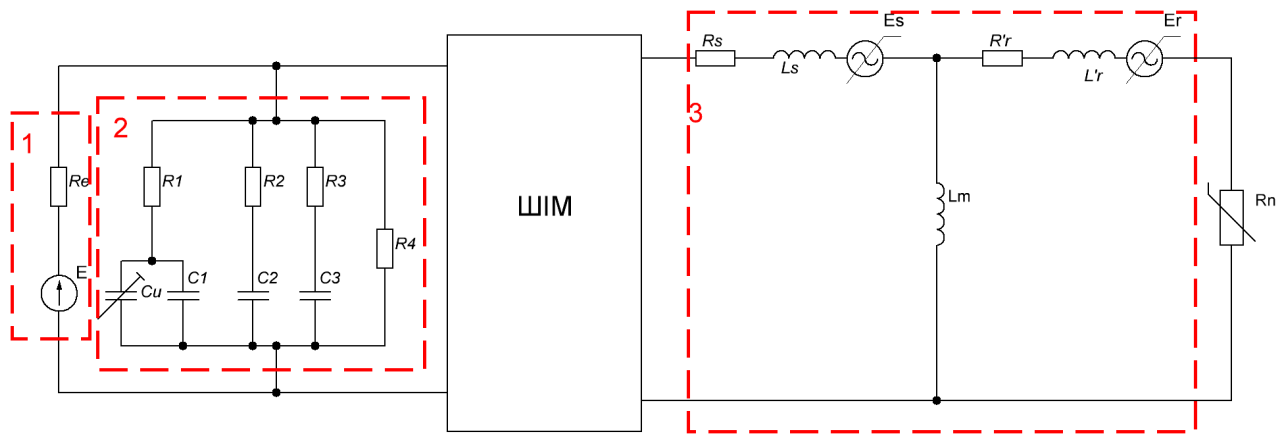


Рисунок 3.7 – Спрощена заступна схема електричного кола електроскутера

Параметри моделей визначаються за рівняннями, наведеними в розділі 2.

Опір навантаження R_n визначається з механічної потужності навантаження:

$$P_2 = \frac{U_2^2}{R_n}$$

$$R_n = \frac{U_2^2}{P_2}, \quad (3.9)$$

де P_2 – механічна потужність, яка визначається навантажувальною характеристикою (рис. 3.4);

U_2 – напруга на виході схеми заміщення двигуна, яку можна визначити з системи (2.21).

Така схема заміщення підходить для дослідження перехідних процесів в нелінійному електричному колі, проте для дослідження енергоефективності вона має суттєвий недолік – не враховуються магнітні втрати в

електромеханічному перетворювачі. Тому схема потребує уточнення. Магнітні втрати в електромеханічному перетворювачі енергії можна розділити на два основні види: втрати на гістерезис (перемагнічування) та втрати на вихрові струми. Іншими додатковими втратами можна знехтувати.

Втрати на гістерезис виникають внаслідок тертя між доменами феромагнітного середовища при зміні напрямку магнітного потоку. Ці втрати пропорційні квадрату магнітного потоку в феромагнетик, а також частоті перемагнічування, тобто частоті струму, що протікає через обмотки двигуна.

Втрати на вихрові струми виникають внаслідок наведення в пластинах феромагнітного осердя ЕРС індукції від основного магнітного потоку і як наслідок утворення струмів в цих пластинах. Величина цих втрат пропорційна квадрату магнітного потоку та квадрату частоти струму, що протікає в обмотках двигуна.

Точний розрахунок магнітних втрат вимагає детального дослідження двигуна. Проте для вирішення задачі дисертації буде достатньо наближеної моделі, в якій припускається, що магнітні втрати пропорційні квадрату магнітного потоку та частоті струму в степені 1,5 [78].

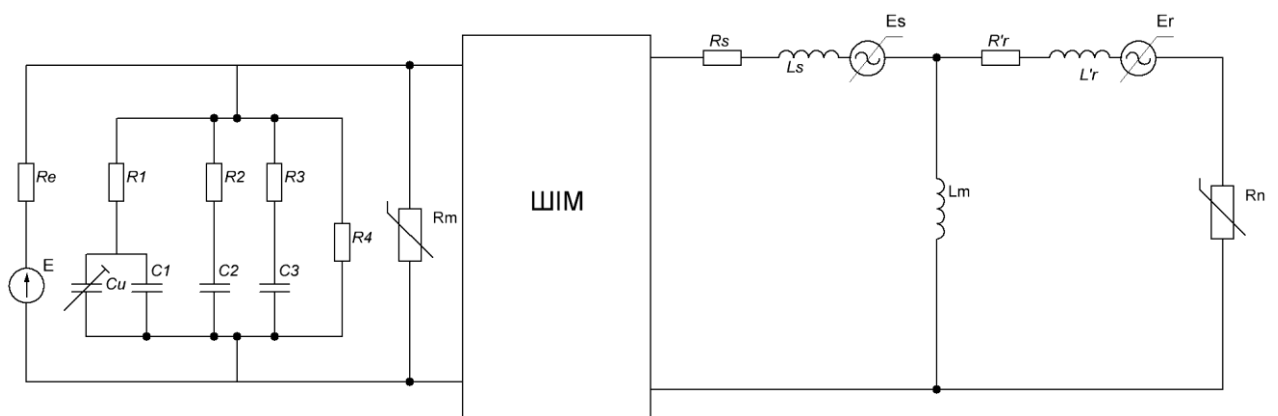


Рисунок 3.8 – Спрощена заступна схема електричного кола електроскутера з урахуванням магнітних втрат

На заступній схемі додаткові втрати найпростіше враховувати у вигляді резистора з нелінійною вольт-амперною характеристикою (рис. 3.8).

Рівняння для знаходження значення опору R_m визначається з відомої рівності потужності електричних втрат на цьому опорі та потужності магнітних втрат:

$$\frac{U_1^2}{R_m} = k_m \psi^2 f^{1,5}$$

$$R_m = \frac{U_1^2}{k_m \psi^2 f^{1,5}}, \quad (3.10)$$

де U_1 – напруга на вході ШІМ;

ψ – магнітний потік, який задається векторним керуванням;

f – частота струму в колі АД, яка задається векторним керуванням;

k_m – коефіцієнт пропорційності, який буде визначений нижче в тексті дисертації.

Спрощена заступна схема на рис. 3.8 достатньо коректно відображає фізичну суть електромагнітних процесів, що протікають в електричному колі електроскутера, проте вона не підходить для точних розрахунків енергоефективності. Заступна схема не враховує точні моделі елементів, розглянутих у розділі 2. Більш точна модель нелінійного електричного кола є математично громіздкою і не дозволяє її вирішення аналітичними методами, тому доцільно використовувати числові методи та комп'ютерне моделювання. Задля цього в програмному пакеті Matlab/Simulink створена комп'ютерна модель нелінійного електричного кола, що показана на рис. 3.9. На рисунку позначено:

- 1 – літій-іонний акумулятор;
- 2 – асинхронний двигун (АД) з короткозамкненим ротором;
- 3 – блок завдання постійного моменту навантаження (сила тертя кочення);
- 4 – схема обчислення моменту опору, пропорційного до квадрату швидкості (сила опору повітря);
- 5 – батарея суперконденсаторів (може бути відключена);

- 6 – електронний перетворювач на базі IGBT-транзисторів;
- 7 – блок векторного керування перетворювачем;
- 8 – блоки завдання швидкості та магнітного потоку для векторного керування;
- 9 – модель для врахування магнітних втрат в АД;
- 10 – блок обчислення магнітних втрат в АД;
- 11 – ємнісний фільтр перетворювача з боку джерела.

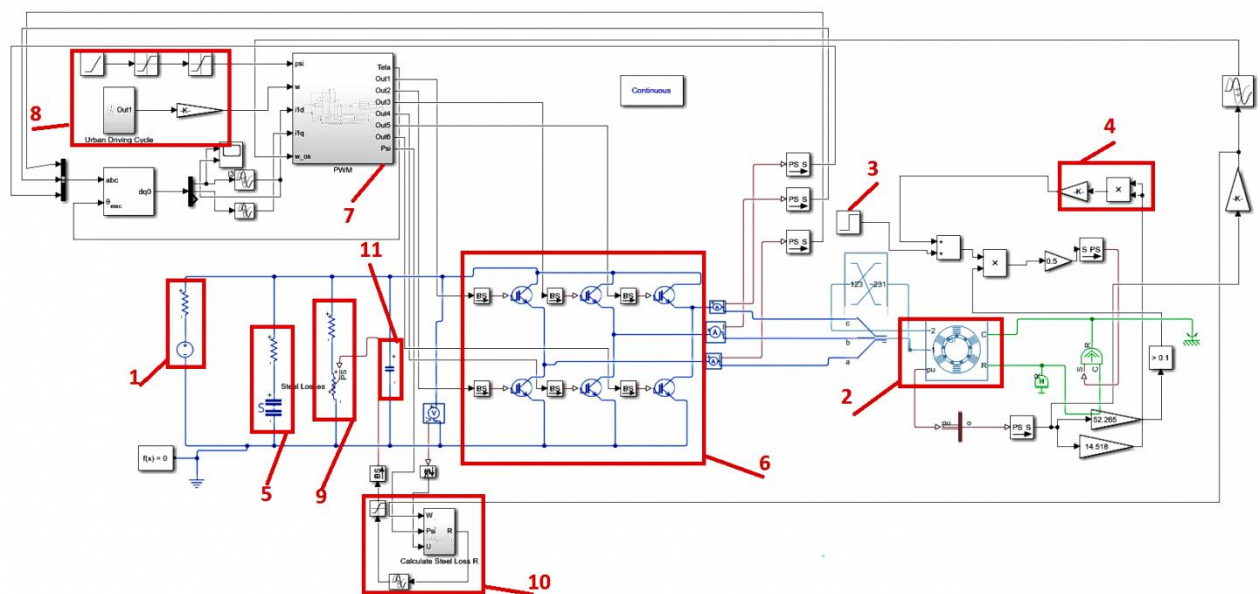


Рисунок 3.9 – Комп'ютерна модель нелінійного електричного кола електроскутера в програмному пакеті Matlab/Simulink

3.3 Експериментальне дослідження елементів нелінійного електричного кола

Для проведення досліджень створена експериментальна установка, функціональна схема якої зображена на рис. 3.10. В якості електромеханічного перетворювача енергії досліджувався асинхронний двигун з короткозамкненим ротором типу M2AA 080 C2 виробництва компанії ABB, ідентичний вибраному для електричного кола електроскутера.

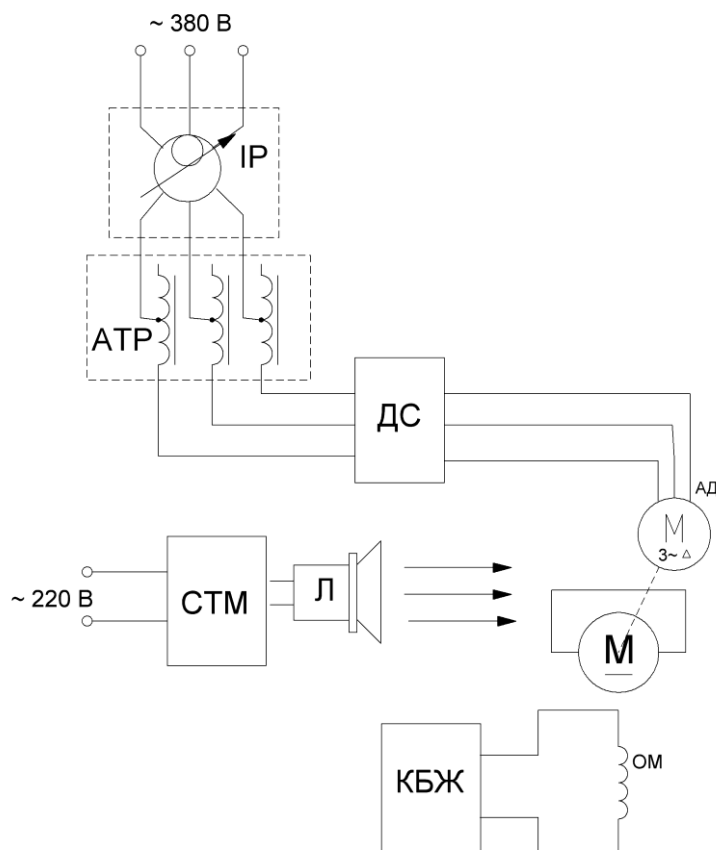


Рисунок 3.10 – Функціональна схема експериментальної установки для дослідження нелінійного електричного кола

Установка живиться трифазною мережею змінного струму 380 В. Ця напруга понижується індукційним регулятором ІР до номінальної напруги 220 В вхідного автотрансформатора АТР. Напруга на виході автотрансформатора, яка регулюється оператором, подається на електродвигун АД. Вал ротора АД з'єднано з моментоміром М. Обмотка ОМ моментоміра М живляться керованим блоком живлення КБЖ, напруга на виході якого регулюється оператором. Для вимірювання частоти обертання ротора АД використовувався строботометр СТМ, лампа Л якого світить на вал, що суміщає двигун та моментомір. Електричні характеристики кола: лінійні струми та напруги, активні та реактивні потужності та коефіцієнти потужності – визначаються за допомогою дослідницького стенду ДС.

Фотографія експериментальної установки зображена на рис. 3.11.

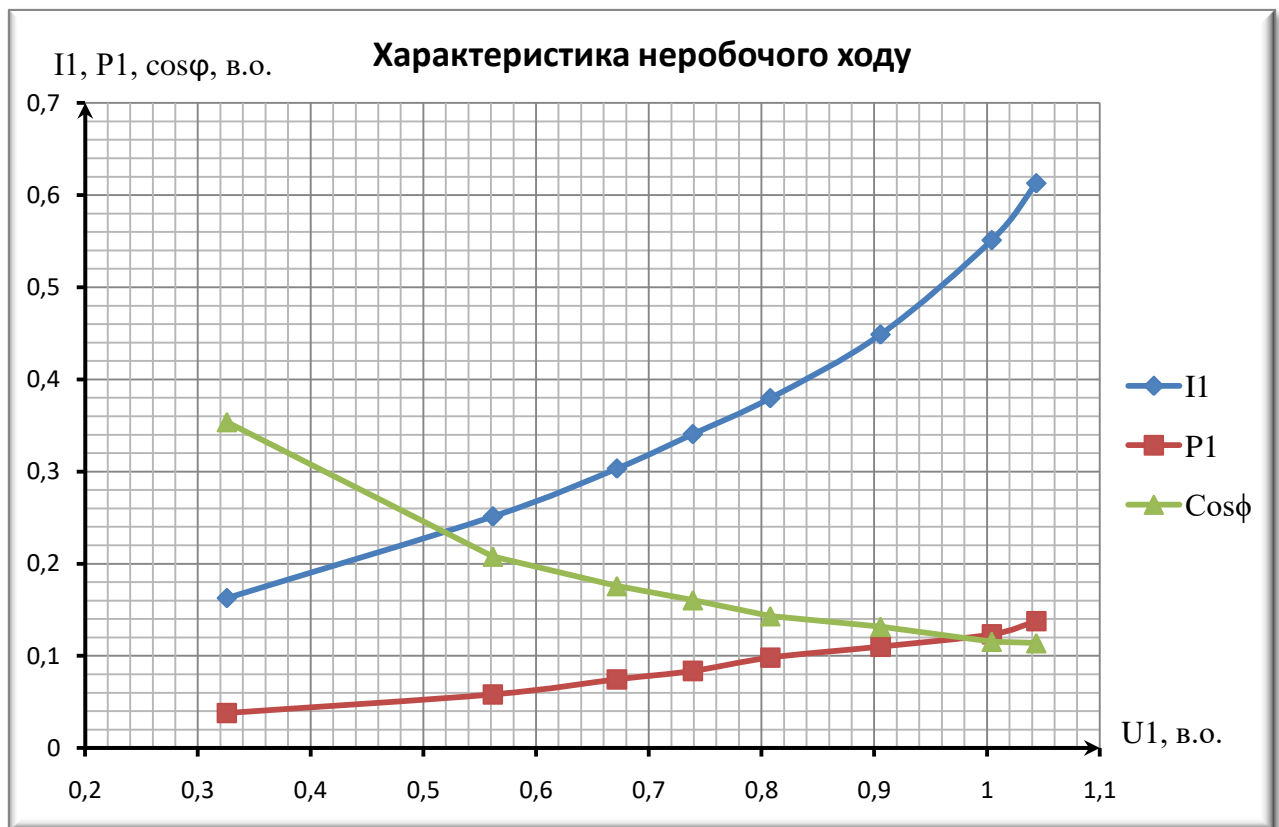


Рисунок 3.11 – Експериментальна установка для дослідження нелінійного електричного кола

Для визначення коефіцієнту k_m для врахування магнітних втрат проведено дослід неробочого ходу асинхронного двигуна. Для цього навантаження, яке задається моментоміром, ставиться нульовим, тобто керований блок живлення моментоміра відключається, а напруга живлення двигуна, яка задається автотрансформатором, поступово змінюється в діапазоні $(1,04 \div 0,3)U_n$. З експерименту визначаються лінійні напруги та струми, потужності кожної з фаз активні та реактивні, а також коефіцієнти потужностей. Дані експерименту занесені в табл. 3.1. та зображені у вигляді графіку на рис. 3.12.

Таблиця 3.1 – Дані досліду неробочого ходу

Дослід неробочого ходу										
U_{1-2}, B	U_{2-3}, B	U_{3-1}, B	U_{Σ}, B	I_1, A	I_2, A	I_3, A	P_1, Bm	P_2, Bm	P_3, Bm	P_{Σ}, Bm
240,5	238,2	241,4	240,1	2,78	2,55	2,21	61,5	37,4	63,9	151,5
231	229	232	231	2,46	2,3	2,02	53,2	36,9	53,2	135,7
208,7	207,4	208,9	208,3	1,94	1,89	1,69	44,5	35,6	40,7	121,1
186	185,5	185,8	185,8	1,59	1,63	1,45	33,1	35,4	30,9	108
170	170	170	170	1,4	1,47	1,32	29,7	35	27	92
154,5	154,8	154,1	154,5	1,23	1,32	1,18	25	32,7	23,7	82
129,5	129,5	128,8	129,2	1,01	1,12	0,96	22,3	26,5	18	64
75,7	75	74,5	74,9	0,7	0,74	0,56	16,4	14,1	11,9	41,7
Q_1, BAp	Q_2, BAp	Q_3, BAp	Q_{Σ}, BAp	S_1, BA	S_2, BA	S_3, BA	S_{Σ}, BA	$\cos\varphi_1$	$\cos\varphi_2$	$\cos\varphi_3$
382	346	307	1031	390	346	309	1045	0,092	0,061	0,119
325	300	265	882	332	307	270	906	0,093	0,070	0,113
233	223	199	653	237	225	204	668	0,109	0,090	0,115
168	168	155	492	173	172	159	504	0,111	0,117	0,114
134	137	128	400	138	141	131	412	0,124	0,140	0,120
109	112	105	325	111	117	107	335	0,131	0,160	0,130
72,6	76,5	71	221	76	81	73	231	0,170	0,182	0,145
25,1	26,9	21,5	73,6	29,6	30,2	24,7	85	0,309	0,254	0,285

Рисунок 3.12 – Залежності струму, потужності та $\cos\varphi$ від напруги АД у відносних одиницях

Потужність P_l , що споживається двигуном в досліді неробочого ходу, майже повністю складається з магнітних та механічних втрат, оскільки струм є доволі низьким, внаслідок чого електричними втратами можна знехтувати. Таким чином вірно буде зазначити, що визначивши залежність потужності неробочого ходу двигуна від напруги живлення, визначається аналогічна залежність магнітних та механічних втрат двигуна. В АД, що живиться від трифазної напруги, магнітний потік прямо пропорційний до напруги живлення. А оскільки магнітні втрати пропорційні до квадрату магнітного потоку, то вони будуть пропорційні й до квадрату напруги живлення. Механічні ж втрати, очевидно, ніяк не залежать від напруги живлення (рис. 3.11).

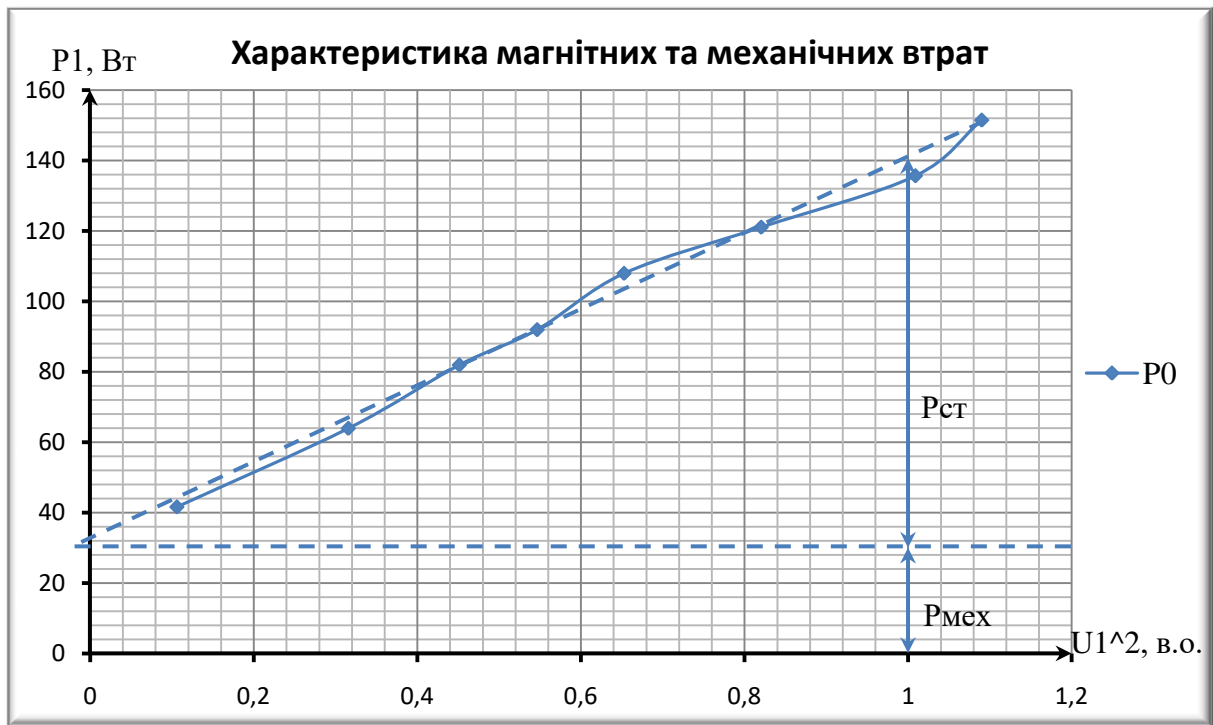


Рисунок 3.11 – Залежність механічних та магнітних втрат від напруги живлення

На основі залежностей на рис. 3.11 визначається коефіцієнт пропорційності k_m :

$$P_m = k_m \psi^2 f^{1.5}$$

$$k_m = \frac{P_{mn}}{\psi_n^2 f^{1.5}} = \frac{140 - 28}{0.936^2 \cdot 50^{1.5}} = 0,362 \text{ А} \cdot \text{с}^{0.5} / \text{Вб}$$

(3.11)

де $P_{mn} = 140-28 \text{ Вт}$ – потужність магнітних втрат за номінальної

напруги живлення, визначена з рис. 3.11;

$\psi_n = 0,936 \text{ Вб}$ – основний магнітний потік двигуна, взятий з його розрахунку (додаток 1);

$f = 50 \text{ Гц}$ – частота напруги живлення дослідницької установки.

Для перевірки адекватності комп'ютерної моделі електричного кола електроскутера був проведений дослід зі зняття робочих характеристик двигуна. Після цього аналогічний дослід був проведений на створеній комп'ютерній моделі задля того, аби порівняти отримані результати та зробити висновки щодо адекватності моделі.

Робочими характеристиками двигуна називаються залежності струму, коефіцієнту потужності, споживаної активної потужності, моменту на валу та швидкості від корисної активної потужності двигуна. Для зняття робочих характеристик навантаження задавалось шляхом зміни напруги на керованому блоці живлення моментоміра, а на самому моментомірі визначався момент на валу. Результати експерименту занесені в табл. 3.2.

Корисна потужність двигуна P_2 визначається за формулою:

$$P_2 = M_2 \cdot \omega_2, \quad (3.12)$$

де M_2 – момент на валу двигуна;

$\omega_2 = n_2 \cdot 2\pi/60$ – кутова швидкість обертання ротора двигуна.

Необхідні дані для побудови робочих характеристик наведено в табл. 3.3-3.4.

Таблиця 3.2 – Дані з експерименту зі зняття робочих характеристик

$U_{1-2},$ B	$U_{2-3},$ B	$U_{3-1},$ B	U_c, B	I_1, A	I_2, A	I_3, A	$P_1,$ Bm	$P_2,$ Bm	$P_3,$ Bm	$P_\Sigma,$ Bm	$M_2,$ $H\cdot m$
213	214,5	213,7	214	1,97	2,03	2,12	55	151	12	190	1,390
212,2	213,7	212,8	213	2,07	2,14	2,2	95	200	13,5	301	5,213
211	212	212	212	2,2	2,3	2,4	160	240	50	460	10,774
209	210	210	211	2,7	2,85	2,85	284	323	103	707	18,421
208	209	209	209	3,42	3,45	3,46	361	398	133	892	23,982
206	207	210	210	3,83	3,9	3,75	406	440	155	1000	27,806
205	206	207	209	4,15	4,1	4,05	432	468	170	1110	36,4
$Q_1,$ BAp	$Q_2,$ BAp	$Q_3,$ BAp	$Q_\Sigma,$ BAp	S_1, BA	S_2, BA	S_3, BA	S_Σ, BA	$\cos\varphi_1$	$\cos\varphi_2$	$\cos\varphi_3$	$n_2,$ $об/хв$
330	220	191	740	333	267	192	765	0,13	0,56	0,07	2987
341	202	188	729	356	280	188	790	0,26	0,69	0,05	2980
346	180	190	736	386	310	206	870	0,44	0,81	0,24	2960
360	143	215	725	450	350	240	1014	0,61	0,9	0,41	2933
390	122	228	735	530	412	266	1150	0,7	0,95	0,51	2916
394	110	234	742	578	455	287	1233	0,71	0,96	0,58	2879
401	120	253	761	599	481	307	1344	0,73	0,97	0,6	2867

Таблиця 3.3 – Експериментальні дані для побудови робочих характеристик

U_c, B	I_c, A	P_c, Bm	$\cos\varphi_c$	$M_2, H\cdot m$	$n_2, об/хв$	$\omega, рад^{-1}$	P_2, Bm
214	2,04	190	0,24	0,139	2987	312,798	43,488
213	2,136	301	0,37	0,521	2980	312,065	162,700
212	2,3	460	0,54	1,077	2960	309,971	333,991
211	2,8	707	0,69	1,842	2933	307,143	565,809
209	3,443	892	0,77	2,398	2916	305,363	732,350
210	3,976	1000	0,79	2,780	2879	301,488	838,328
209	4,1	1110	0,8	3,64	2867	300,232	1092,845

Таблиця 3.4 - Експериментальні дані для побудови робочих характеристик у відносних одиницях

$I_c, в.о.$	$P_c, в.о.$	$\cos\varphi_c$	$M_2, в.о.$	$n_2, в.о.$	$P_2, в.о.$
0,497	0,172	0,3	0,037	1,040	0,039
0,521	0,273	0,462	0,142	1,038	0,147
0,560	0,418	0,675	0,294	1,031	0,303
0,682	0,642	0,862	0,503	1,021	0,514
0,839	0,810	0,962	0,655	1,016	0,665
0,969	0,909	0,987	0,759	1,003	0,762
1	1,009	1	0,994	0,998	0,993

Робочі характеристики зображені на рис. 3.12.

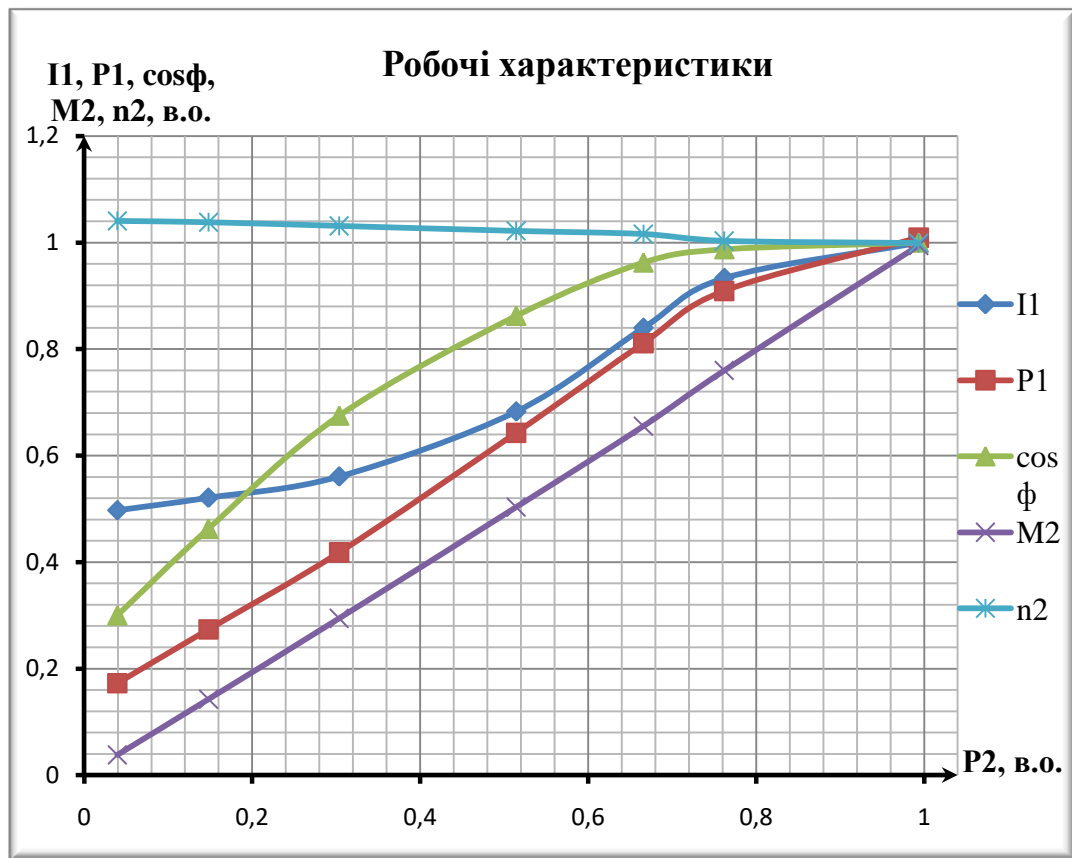


Рисунок 3.12 – Експериментальні робочі характеристики електромеханічного перетворювача енергії

Для порівняння з експериментом аналогічні дослідження були змодельовані в комп'ютерній моделі Matlab/Simulink. Результати моделювання наведені в табл. 3.5.

Таблиця 3.5 – Робочі характеристики, що отримані за допомогою комп'ютерного моделювання кола

U_c, B	I_c, A	$\cos\phi_c$	$M_2, H\cdot m$	$\omega, рад^{-1}$	$P_2, Вт$
214	1,987	0,2958	0,139	313,7	43,604
213	2,0831	0,4394	0,521	312,3	162,71
212	2,3257	0,604	1,077	310,19	334,07
211	2,8171	0,7476	1,842	307,08	565,64
209	3,2612	0,8119	2,398	304,49	730,17
210	3,59	0,8379	2,78	302,86	841,95
209	4,4208	0,8788	3,64	298,45	1086,4

Порівняння експериментальних та змодельованих даних представлені на рис. 3.13-3.15.

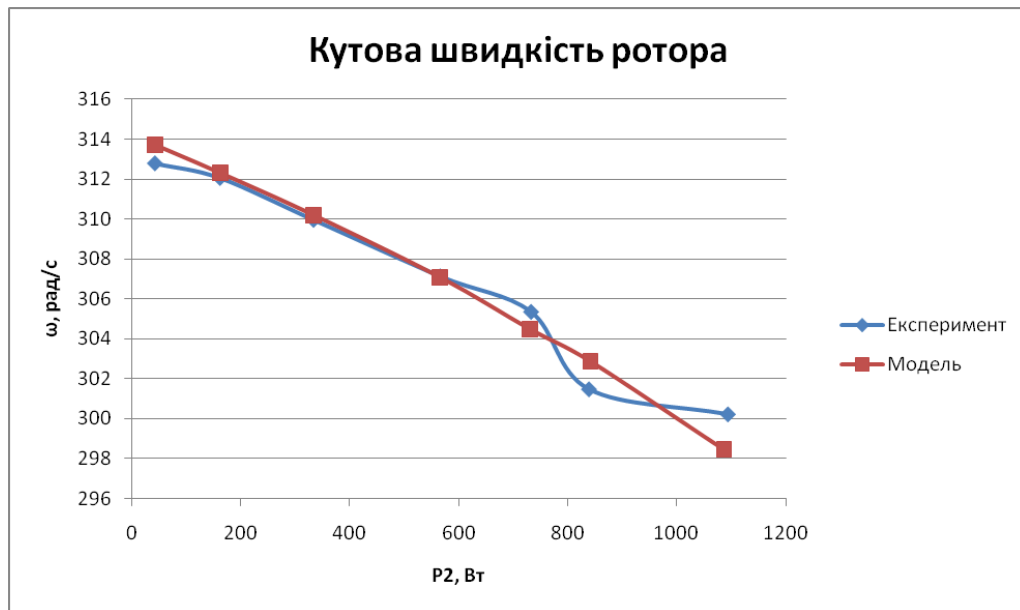


Рисунок 3.13 – Порівняння кутової швидкості ротора

Як видно з рис. 3.13, характер зміни швидкості зі зміною навантаження в моделі повністю відповідає реальному. Найбільша похибка приблизно в 0,6 % в точці максимального навантаження є суттєво незначною. Отже, комп'ютерна модель з високою точністю повторює реальну динаміку двигуна.

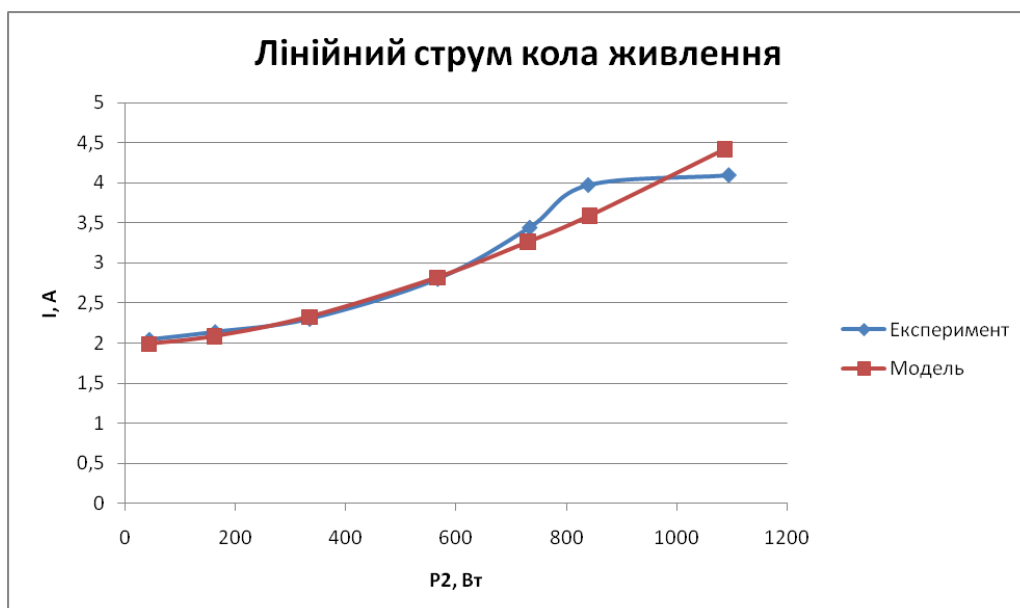


Рисунок 3.14 – Порівняння лінійного струму кола живлення двигуна

Я видно з рис. 3.14, модель з дуже високою точністю розраховує струми при навантаженнях, що не перевищують $2/3$ від номінального. При більших навантаженнях відхилення від експерименту сягає 9,7%. Це може бути викликано нелінійністю деяких елементів кола, зокрема зростанням активного опору обмоток з їх нагріванням. Враховуючи те, що в досліджуваному режимі (рис. 3.4) переважну більшість часу двигун працює в режимі недовантаження, а режим номінального навантаження триває невеликий проміжок часу, розрахункова похибка від цієї нелінійності буде несуттєва, тому нею можна буде знехтувати.

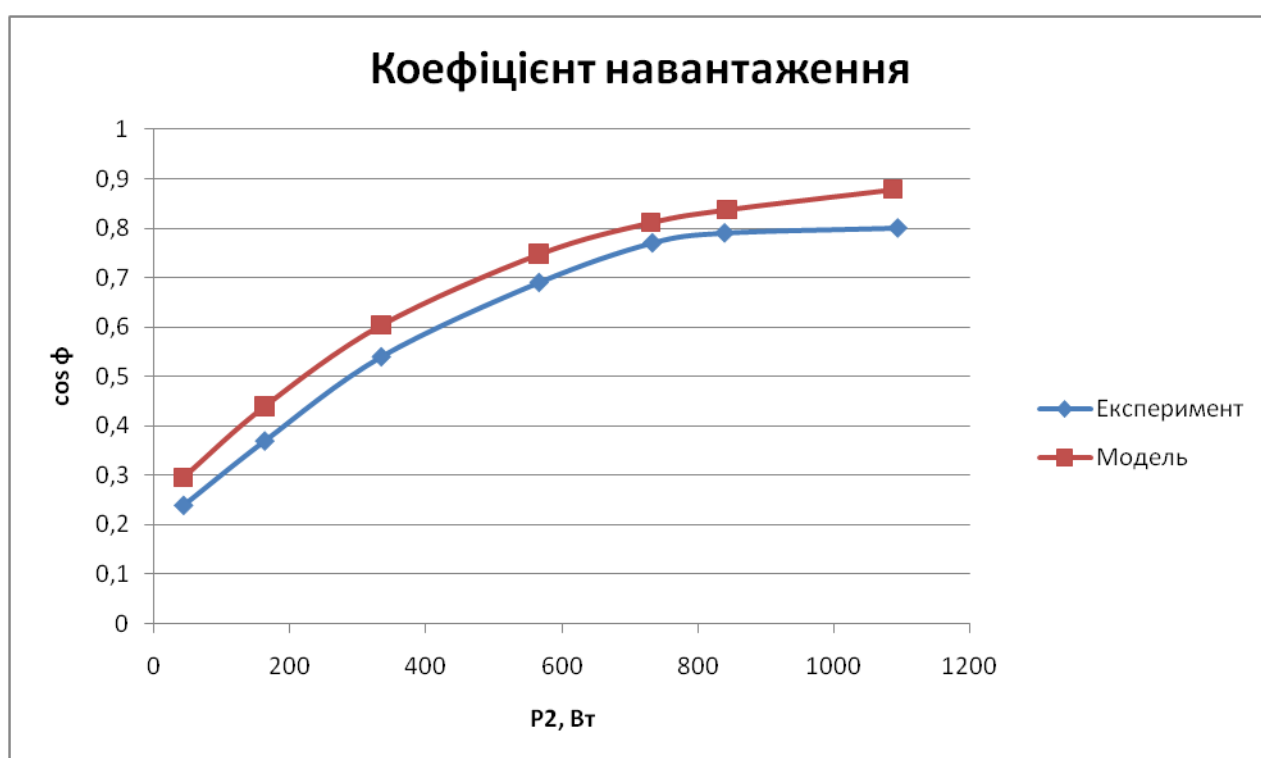


Рисунок 3.15 – Порівняння коефіцієнту навантаження кола

Як видно з рис. 3.15, розрахунок моделі вказує на більш високий, ніж реальний, коефіцієнт навантаження. Очевидно, це викликано фізичним зношенням (старістю) двигуна, який використовувався для проведення експерименту. Як відомо, з часом у двигуна в першу чергу погіршуються характеристики магнітного кола, що відображається в основному на коефіцієнті навантаження. Саме тому модель, створена за розрахунком двигуна в новому

стані, показує «кращі» результати, аніж реальний двигун. Тим не менше, характер зміни кута навантаження разом із самим навантаженням в моделі повністю відповідає реальному.

Отже, не зважаючи на певні розбіжності, які викликані переважно саме неточністю з боку експериментальної сторони, можна стверджувати, що комп'ютерна модель є адекватною та достатньо точною для проведення досліджень нелінійного кола. Після верифікації комп'ютерної моделі подальші дослідження енергоефективності нелінійного електричного кола з автономним живленням можна проводити на моделі.

3.4 Дослідження енергоефективності нелінійного електричного кола на комп'ютерній моделі

Метою дослідження є підвищення енергоефективності перетворення енергії в нелінійному електричному колі зі змінним навантаженням. Проводиться пошук параметрів та режимів, при яких для виконання однієї і тієї самої роботи – міського їздового циклу (рис. 3.3-3.4), буде спожито мінімум енергії. Досягнути мету можна шляхом зміни структури і параметрів джерела живлення та суперконденсатора, або режиму керування електромеханічним перетворювачем.

3.4.1 Дослідження залежності енергоефективності кола від режиму роботи електромеханічного перетворювача

Як відомо, при завданні амплітуди та положення вектора напруги живлення електромеханічного перетворювача встановлюється частота обертання ротора двигуна та величиною магнітного потоку в його магнітопроводі. Частота обертання ротора в даному випадку жорстко прив'язана до завдання на відпрацювання міського їздового циклу, тому її не можна змінювати для покращення енергоефективності. Магнітний потік не

обмежений завданням, тому можливо знайти його раціональне значення, за якого буде споживатись мінімум енергії.

Зазвичай при живленні силового кола від електричної мережі з практично необмеженою потужністю (внутрішній опір джерела прямує до нуля) раціональне значення магнітного потоку задається близьким до номінального при номінальному навантаженні, а при зменшенні навантаження стає доцільним зменшення магнітного потоку. На цьому побудовані відомі стратегії керування електродвигуном з мінімізацією втрат, мінімумом споживання струму чи максимізацією відношення моменту до струму [102]. В даному випадку автономне джерело живлення має обмежену потужність, тому вказані стратегії керування не є очевидними.

Загалом, магнітний потік двигуна обмежений згори номінальним значенням – для даного двигуна воно складає $\psi_n = 0,9363$ Вб (див. додаток А). При збільшенні потоку понад це значення матеріал магнітопроводу – електротехнічна сталь – переходить у стан насичення, що призведе до значного зростання втрат. При малому магнітному потоці електромагнітного моменту на валу двигуна може стати недостатньо для реалізації заданої швидкості електроскутера. Тому пошук раціональної робочої точки проводитиметься в межах $(0,35\psi_n \dots \psi_n)$. Чим більший магнітний потік, тим будуть більші магнітні втрати в колі, але тим буде менший струм двигуна і, відповідно, електричні втрати.

При проведенні дослідження електричного кола визначалась корисна потужність $P1$, споживана потужність $P2$ та ККД для різних значень швидкості електроскутера v та магнітного потоку ψ . Навантаження на валу двигуна змінювалось однозначно із зміною швидкості відповідно до характеристики навантаження (3.2). Результати досліджень занесено у табл. 3.6.

Таблиця 3.6 – Залежність спожитої енергії та ККД від магнітного потоку
для різних швидкостей

v = 50 км/год			v = 45 км/год			v = 40 км/год		
P2 = 637,2 Вт			P2 = 499,9 Вт			P2 = 385,8 Вт		
ψ/ψn, %	P1, Вт	ККД	ψ/ψn, %	P1, Вт	ККД	ψ/ψn, %	P1, Вт	ККД
100	910,7	0,700	100	703	0,711	100	539	0,716
95	921,6	0,691	95	710	0,704	95	543,5	0,710
90	935,6	0,681	90	719,5	0,695	90	549,8	0,702
85	953,8	0,668	85	732	0,683	85	558,4	0,691
80	977,2	0,652	80	748,2	0,668	80	569,6	0,677
75	1007	0,633	75	769,1	0,650	75	584,2	0,660
70	1045,5	0,609	70	796	0,628	70	603,2	0,640
65	1095,2	0,582	65	830,7	0,602	65	627,8	0,615
60	1160,4	0,549	60	876,7	0,570	60	660,3	0,584
55	1247,5	0,511	55	937,4	0,533	55	703,4	0,548
50	1367,2	0,466	50	1020,2	0,490	50	761,8	0,506
45	1537,5	0,414	45	1136,4	0,440	45	843,3	0,457
40	1793,6	0,355	40	1306,7	0,383	40	961	0,401
35	2214,1	0,288	35	1572,5	0,318	35	1140,6	0,338

v = 35 км/год			v = 30 км/год			v = 25 км/год		
P2 = 292,4 Вт			P2 = 217 Вт			P2 = 157,2 Вт		
ψ/ψn, %	P1, Вт	ККД	ψ/ψn, %	P1, Вт	ККД	ψ/ψn, %	P1, Вт	ККД
100	409,8	0,714	100	308,5	0,703	100	229,7	0,684
95	412,6	0,709	95	310,2	0,700	95	230,8	0,681
90	416,8	0,702	90	313	0,693	90	232,6	0,676
85	422,6	0,692	85	316,9	0,685	85	235,4	0,668
80	430,3	0,680	80	322,3	0,673	80	239,2	0,657
75	440,6	0,664	75	329,6	0,658	75	244,4	0,643
70	454,1	0,644	70	339,2	0,640	70	251,4	0,625
65	471,6	0,620	65	351,8	0,617	65	260,6	0,603
60	494,8	0,591	60	368,6	0,589	60	272,9	0,576
55	525,6	0,556	55	390,8	0,555	55	289,3	0,543
50	567,4	0,515	50	421	0,515	50	311,5	0,505
45	625,4	0,468	45	463	0,469	45	342,3	0,459
40	708,7	0,413	40	522,8	0,415	40	386,2	0,407
35	834,1	0,351	35	612,5	0,354	35	451,7	0,348

$v = 20 \text{ км/год}$			$v = 15 \text{ км/год}$		
$P_2 = 110,2 \text{ Вт}$			$P_2 = 73,65 \text{ Вт}$		
$\psi/\psi_n, \%$	$P_1, \text{ Вт}$	ККД	$\psi/\psi_n, \%$	$P_1, \text{ Вт}$	ККД
100	169	0,652	100	122,3	0,602
95	169,7	0,649	95	122,8	0,600
90	170,9	0,645	90	123,9	0,594
85	172,9	0,637	85	125,4	0,587
80	175,8	0,627	80	127,6	0,577
75	179,6	0,614	75	130,7	0,564
70	184,9	0,596	70	134,8	0,546
65	191,8	0,575	65	140,2	0,525
60	201,1	0,548	60	147,5	0,499
55	213,4	0,516	55	157,2	0,469
50	230,2	0,479	50	170,5	0,432
45	253,4	0,435	45	188,7	0,390
40	286,6	0,385	40	214,6	0,343
35	335,8	0,328	35	253,1	0,291

$v = 10 \text{ км/год}$			$v = 5 \text{ км/год}$		
$P_2 = 44,79 \text{ Вт}$			$P_2 = 21,11 \text{ Вт}$		
$\psi/\psi_n, \%$	$P_1, \text{ Вт}$	ККД	$\psi/\psi_n, \%$	$P_1, \text{ Вт}$	ККД
100	86,3	0,519	100	57,9	0,365
95	86,8	0,516	95	58,5	0,361
90	87,7	0,511	90	59,4	0,355
85	89,1	0,503	85	60,7	0,348
80	91	0,492	80	62,5	0,338
75	93,6	0,479	75	64,9	0,325
70	97	0,462	70	68,1	0,310
65	101,6	0,441	65	72,2	0,292
60	107,7	0,416	60	77,7	0,272
55	115,8	0,387	55	84,9	0,249
50	126,7	0,354	50	94,7	0,223
45	141,9	0,316	45	108,1	0,195
40	163,3	0,274	40	127,1	0,166
35	195,1	0,230	35	155,2	0,136

Тривимірні графіки залежності ККД електричного кола від магнітного потоку та швидкості електроскутера зображені на рис. 3.16.

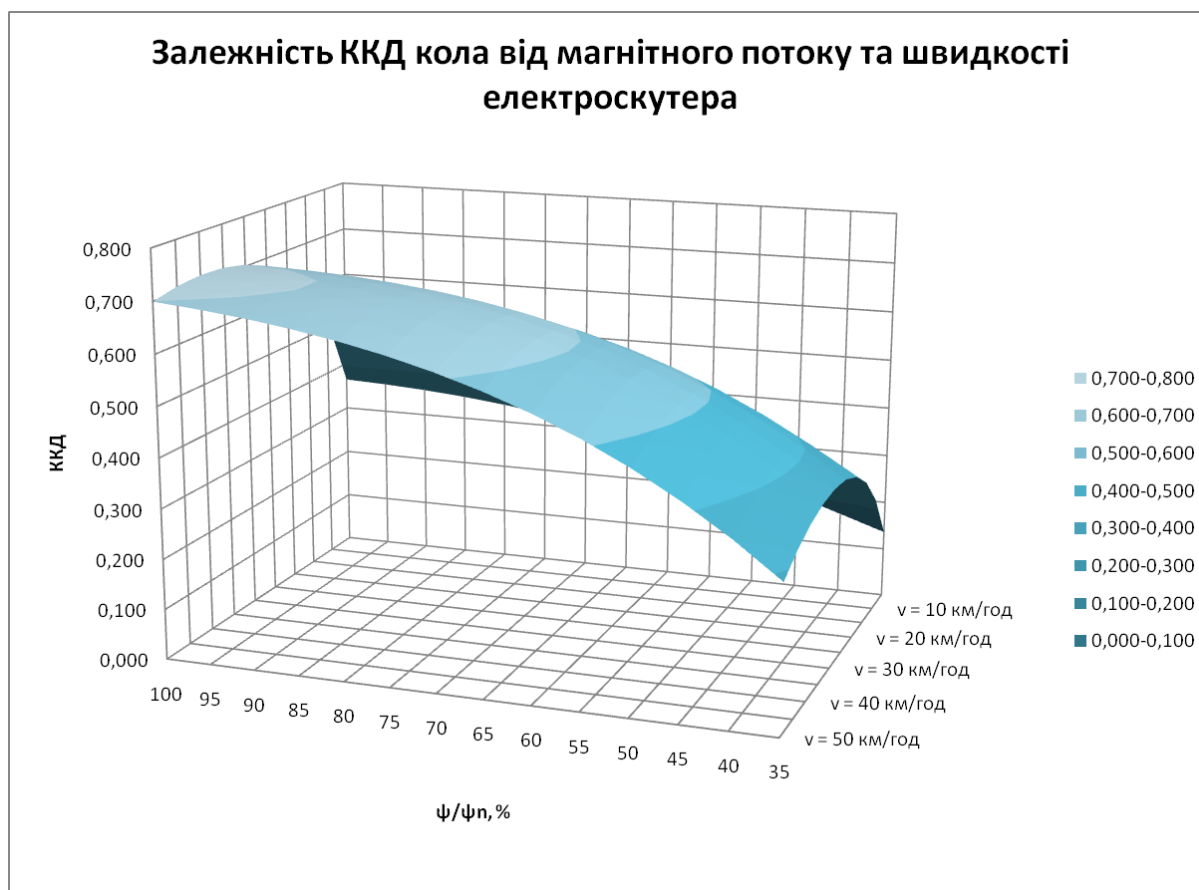


Рисунок 3.16 – Залежність ККД електричного кола від магнітного потоку та швидкості електроскутера

Як можна побачити з цих даних, для будь-якої швидкості найбільший ККД спостерігатиметься саме при номінальному магнітному потоці. Даний результат не співпадає з результатами векторного керування при звичайному живленні від електромережі. Його відмінність пояснюється тим, що у колі з автономним джерелом живлення (акумуляторна батарея), яке має великий внутрішній опір, електричні втрати мають підвищене значення. Зменшення магнітного потоку призводить до збільшення струму і ще сильнішому зростанню цих втрат, яке вже не компенсується зменшенням магнітних втрат. Тому при керуванні електроскутером доцільно завжди задавати номінальне значення магнітного потоку.

Варто зауважити, що ці дослідження проводились виключно для усталених режимів роботи. Під час перехідних процесів струми в колі є більшими, що підвищує й електричні втрати. Тому, якщо зменшення потоку

недоцільне в усталених режимах, то тим більш воно є недоцільним при перехідних процесах. Оскільки наявність у колі суперконденсатора впливає на енергетичні процеси під час динамічних режимів, то пошук раціонального значення магнітного потоку проводився в колі, де він не підключений.

3.4.2 Дослідження залежності енергоефективності кола від ємності суперконденсатора

Після визначення раціонального значення магнітного потоку доцільно проводити широкі дослідження енергоефективності при відпрацювання навантаження за міським їздовим циклом відповідно залежностей, представлених на рис. 3.3-3.4. Моделювання проводиться для схеми електричного кола з джерелом живлення без суперконденсатора, а також з батареєю суперконденсаторів, сконфігурованої у підрозділі 3.1

Батарея складається зі 138-ми послідовно з'єднаних ланок, кожна з яких буде або одним суперконденсатором, або паралельним з'єднанням, ємностями 50, 75, 100, 125, 150 та 200 Ф. Таким чином, загальна ємність батареї змінюватиметься в межах (0,36..1,45) Ф (оцінкова необхідна ємність батареї склала 0,65 Ф). Також залежно від конфігурації батареї суперконденсаторів змінюватиметься її маса, і відповідно, повна маса електроскутера, що вплине на величину навантаження.

При моделюванні визначається залежність струму джерела, споживаної потужності та напруги на суперконденсаторі від часу при виконанні міського їздового циклу.

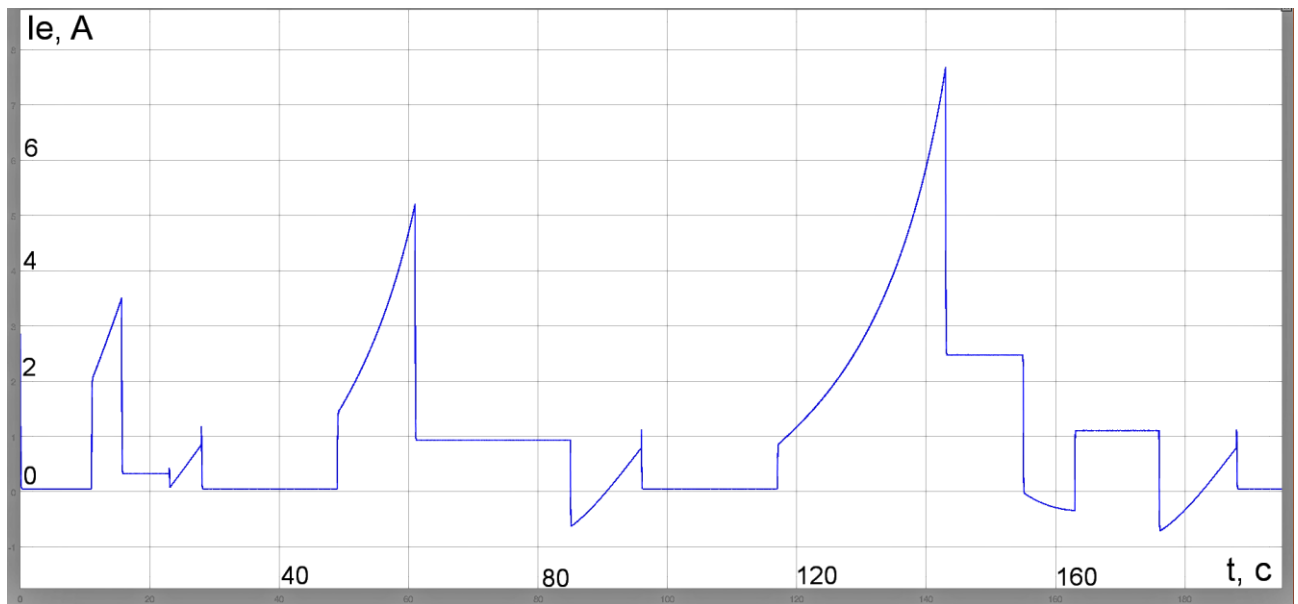


Рисунок 3.17 – Залежність струму акумулятора від часу при відсутності суперконденсатора

На рис. 3.17 зображена залежність струму акумулятора від часу за відсутності суперконденсатора. Як видно, ця залежність має характерні піки під час розгону електроскутера, які викликають значні електричні втрати на внутрішньому електричному опорі джерела. В період гальмування відбувається часткова рекуперація енергії, але незначна. Для даного випадку миттєва споживана потужність визначається за формулою:

$$P_1 = I_e \cdot E, \quad (3.13)$$

де I_e – струм через акумуляторну батарею (рис. 3.17),

$E = 370$ В – ЕРС акумуляторної батареї.

Споживана потужність прямо пропорційна до струму акумулятора, тому форма її залежності від часу буде така сама, як на рис. 3.17. Загальну спожиту за цикл потужність визначається за формулою:

$$W_1 = \int_{t=0}^{t_1} P_1 dt \quad (3.14)$$

Її залежність від часу зображена на рис. 3.18.

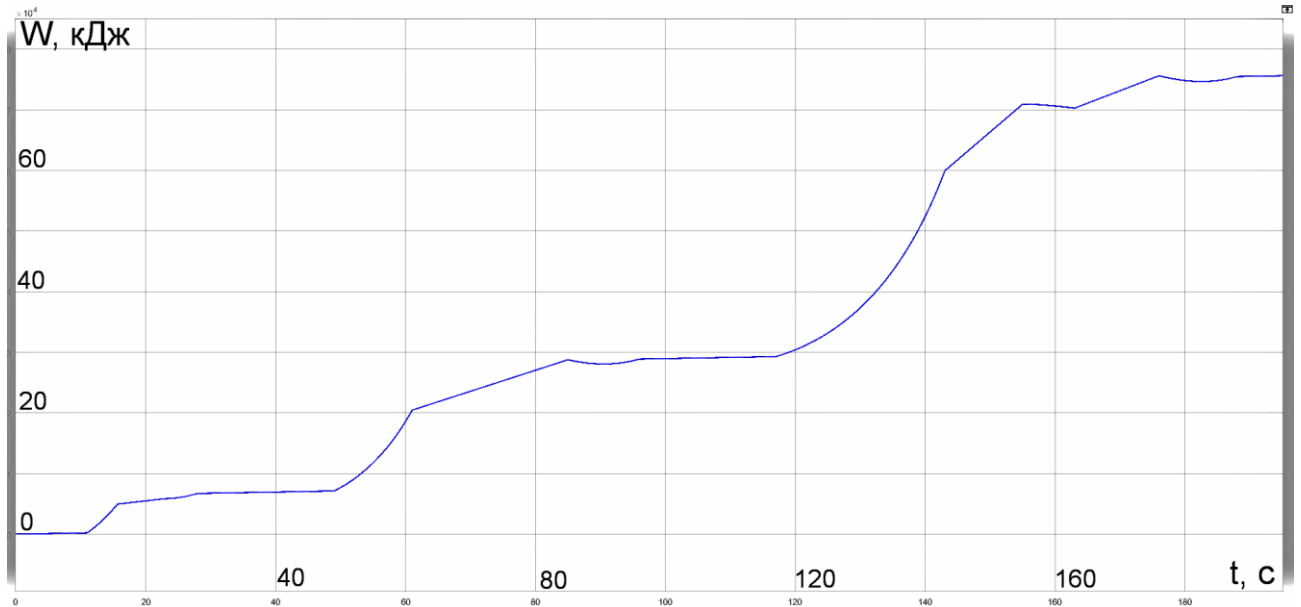


Рисунок 3.18 – Залежність спожитої в колі енергії від часу при відсутності суперконденсатора

З цього графіку видно, що основне споживання відбувається саме в періоди розгону електроскутера, а тому саме ці перехідні процеси потребують особливої уваги при дослідженні енергоефективності кола. Загальна спожита за цикл потужність складає 75638 Дж.

Коефіцієнт корисної дії за весь цикл можна визначити за формулою:

$$\eta = \frac{\int_{t=0}^{t_1} M_2 \cdot \omega dt}{\int_{t=0}^{t_1} P_1 dt} = \frac{\int_{t=0}^{t_1} M_2 \cdot \omega dt}{W_1} \quad (3.15)$$

де M_2 – момент навантаження двигуна,

ω – кутова швидкість обертання ротора двигуна.

Для даного випадку коефіцієнт корисної дії дорівнюватиме 0,400.

Досліджено випадок, коли ємність однієї ланки батареї складає 100 Ф, а ємність батареї дорівнює 0,725 Ф. Залежність струму акумулятора від часу для даного випадку зображена на рис. 3.19.

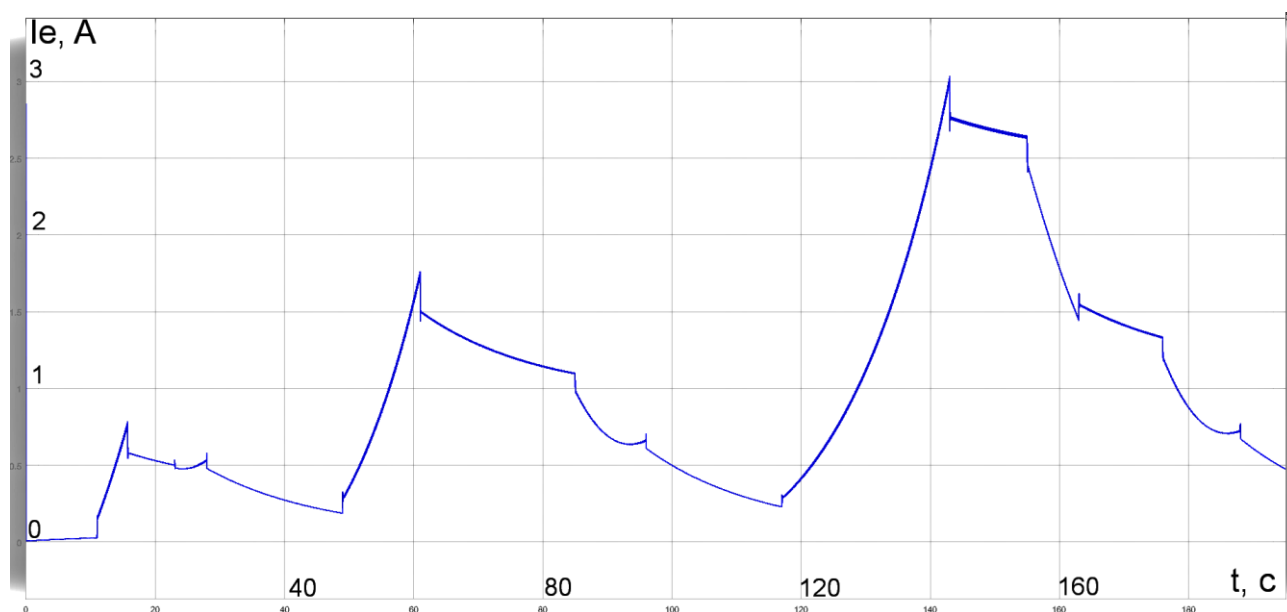


Рисунок 3.19 – Залежність струму акумулятора від часу при ємності суперконденсатора 100 Ф

Як видно, порівнявши залежності на рис. 3.17 та 3.19, струм через акумулятор став більш рівномірний. Пікове значення струму зменшилось в 2,5 рази з 7,7 А до 3 А. Це не тільки значно зменшує електричні втрати на активному електричному опорі в колі, що прямо підвищує його енергоефективність, але й подовжує тривалість експлуатації акумуляторів, які вразливі до ударних струмів. Крім того, більше нема «простоїв», акумулятор завжди працює, як не на навантаження, то на дозаряд суперконденсатора. Рекуперація відбувається тепер не шляхом заряду акумулятора, а через суперконденсатор, що є більш ефективним з точки зору втрат. Це все досягається за рахунок значно меншого внутрішнього електричного опору батареї суперконденсаторів порівняно з акумуляторною батареєю, внаслідок чого більша частина пікових струмів проходить саме через суперконденсатори (рис. 3.20).

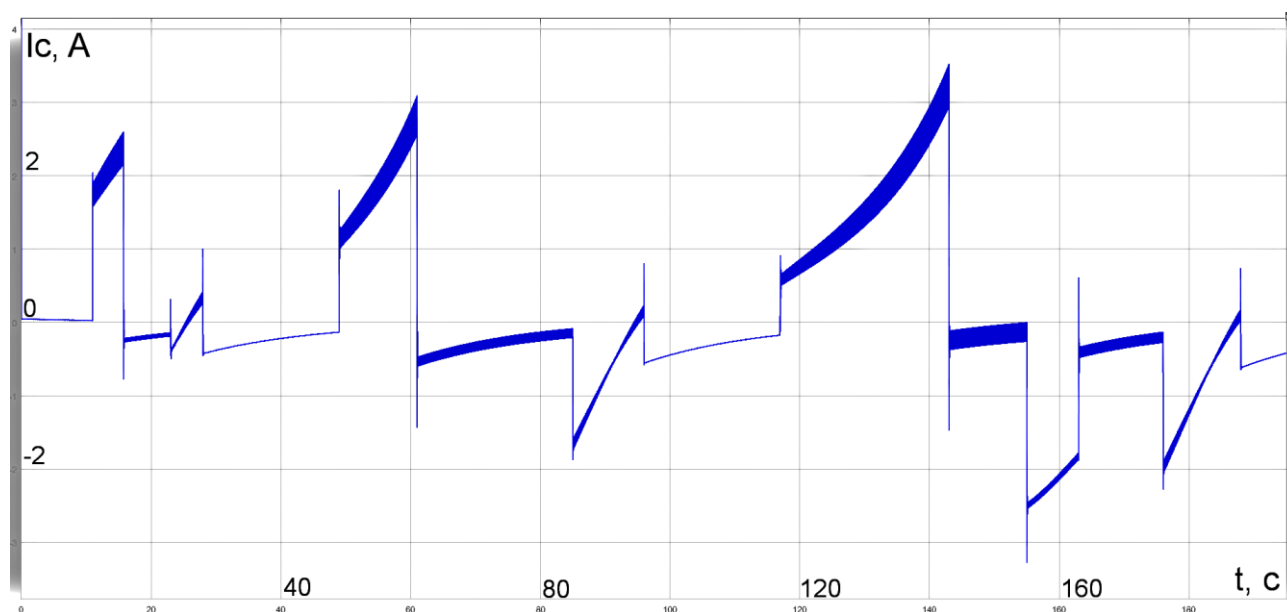


Рисунок 3.20 – Залежність струму суперконденсатора від часу при ємності суперконденсатора 100 Ф

На рис. 3.20 зображена залежність струму суперконденсатора від часу. Порівнявши його з даними на рис. 3.17 можна зробити висновок, що під час гальмувань при наявності суперконденсатора рекуперація відбувається значно ефективніше за рахунок меншого опору батареї.

Варто також перевірити, як сильно розряджаються суперконденсатори за час циклу (рис. 3.21). Як видно, навіть при розгоні до максимальної за цикл швидкості напруга на батареї суперконденсаторів не опустилась нижче номінальної (330 В). Це пояснюється тим, що ємність батареї в даному колі вища за оцінково необхідну. Також можна зауважити, що суперконденсатори не встигають повністю дозарядитись під час пауз руху, а тому наступний етап починається зі зниженої напруги, що призводить до часткового зниження ефективності роботи електричної схеми.

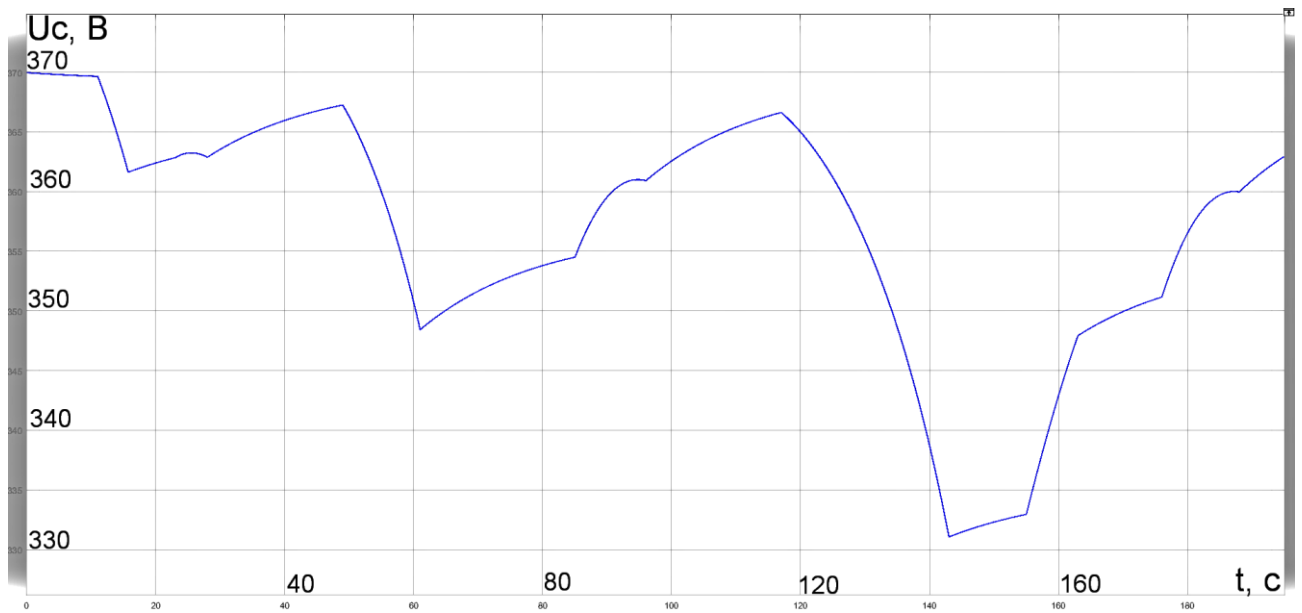


Рисунок 3.21 – Залежність напруги на батареї суперконденсаторів від часу при ємності суперконденсатора 100 Ф

В даному випадку визначати споживану потужність за формулою (3.14) вже не можна, оскільки вона не враховує зміну енергії, накопиченої на суперконденсаторах. Для врахування цього необхідно скористатись наступною формулою:

$$W_1 = E \cdot \int_{t=0}^{t_1} I_e dt + \int_{t=0}^{t_1} I_c \cdot U_c dt \quad , \quad (3.16)$$

де I_c – струм через суперконденсатор (рис. 3.20),

U_c – напруга на суперконденсаторі (рис. 3.21).

Визначивши за цією формулою споживану потужність, можна побудувати графік залежності її від часу (рис. 3.22).

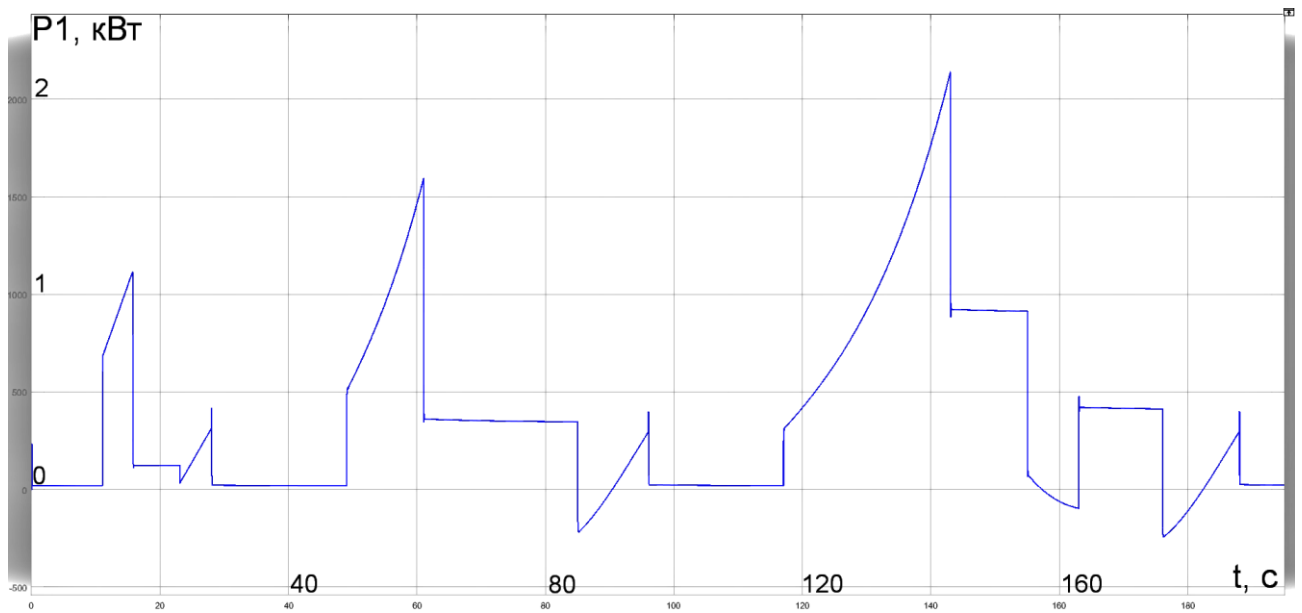


Рисунок 3.22 – Залежність споживаної в колі потужності від часу при ємності суперконденсатора 100 Ф

Порівнявши результати на рис. 3.22 та 3.17 можна зробити висновок, що за характером вони дуже схожі і потужність, яка споживається в колі з джерела загалом слабо змінюється, відрізняється лише розподіл споживання між акумулятором та суперконденсатором. Тим не менше, точні чисельні розрахунки показали, що в даному випадку за весь цикл буде спожито 72695 Дж, що на 3,89% менше, ніж за відсутності суперконденсатора. Отже, можна підтвердити, що наявність суперконденсатора, паралельно підключеного до акумулятора, покращує енергоефективність нелінійного електричного кола з автономним живленням.

Коефіцієнт корисної дії можна розрахувати за формулою (3.15) і він складає 0,422, порівняно з 0,400 за відсутністю суперконденсатора.

Подібні розрахунки були проведені і для інших конфігурацій батареї суперконденсаторів. Дані наведені в табл. 3.7.

Таблиця 3.7 – Дослідження енергоефективності кола в залежності від ємності суперконденсатора

c_1, Φ	c, Φ	$W_1, \text{Дж}$	$dW, \%$	$W_2, \text{Дж}$	ККД
0	0	75638		30286	0,4004
50	0,362	73223	3,193	30511	0,4167
75	0,543	72906	3,612	30641	0,4203
100	0,725	72695	3,891	30707	0,4224
125	0,906	72888	3,636	30836	0,4231
150	1,087	73009	3,476	30932	0,4237
200	1,449	73473	2,862	31128	0,4237

де c_1 – ємність однієї ланки суперконденсаторної батареї;

$c = c_1/138$ – ємність батареї суперконденсаторів;

W_1 – спожита в колі за цикл енергія;

$dW = W_1/W_{c=0} \cdot 100\%$ – зменшення споживаної енергії;

W_2 – корисна енергія;

ККД – коефіцієнт корисної дії.

Залежність ККД від ємності суперконденсатора зображена на рис. 3.23.

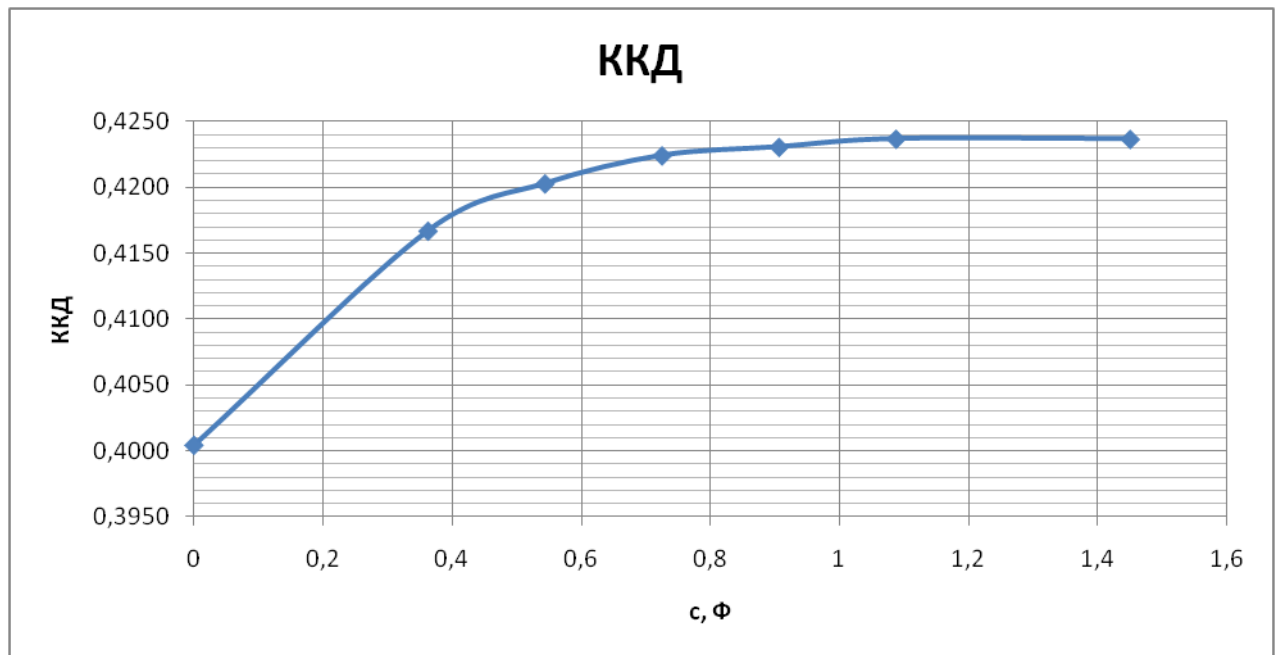


Рисунок 3.23– Залежність ККД кола від ємності суперконденсатора

Як видно з рис. 3.23, при збільшенні ємності суперконденсатора ККД кола завжди зростатиме. Щоправда, основне збільшення відбувається при зміні ємності до оцінково необхідного значення рівного 0,65 Ф.

Варто зауважити, що при розгляді енергоефективності транспортних засобів коефіцієнт корисної дії хоч і добре зображує зміни фізичних процесів у колів, проте він не є репрезентативним показником. Річ у тім, що при його обчисленні в якості корисної потужності береться потужність на подолання сили опору руху транспорту. Ця потужність залежить від маси транспортного засобу: чим він важчий, тим корисна потужність буде більша. Але якщо додати до електроскутера додаткову масу суперконденсаторів, то для водія «корисна потужність» ніяк не зміниться. Тому для визначення енергоефективності кола в даному випадку більш доцільно використовувати у якості визначального параметру спожиту за міський їздовий цикл енергію. Саме за цим параметром і здійснюється пошук раціонального значення. Залежність спожитої енергії від ємності суперконденсатора зображена на рис. 3.24.

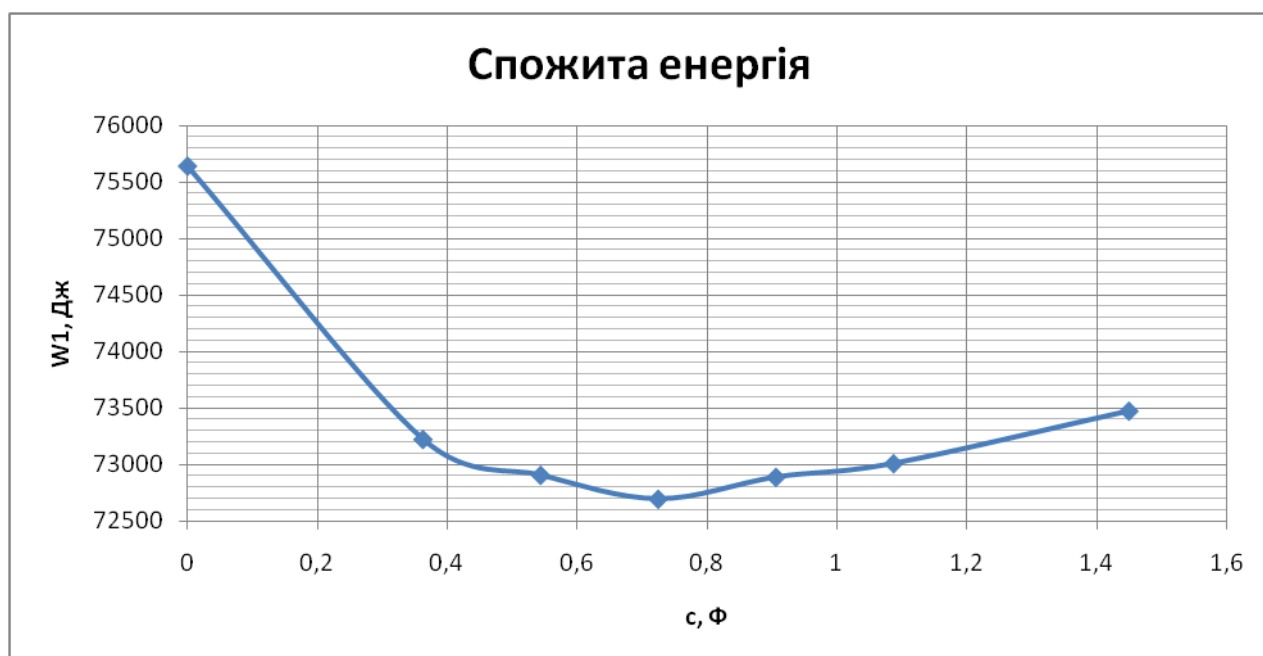


Рисунок 3.24 – Залежність спожитої за цикл у колі енергії від ємності суперконденсатора

Як видно з рис. 3.24, існує певне раціональне значення ємності суперконденсатора, за якого буде спожита найменша кількість енергії для виконання міського їздового циклу. Для даного кола вона складає 0,725 Ф і відповідає батареї зі 138-ми послідовно з'єднаних суперконденсаторів ємністю 100 Ф кожний. При значенні ємності суперконденсатора меншій за дану при розгоні він буде розряджатись до напруги нижчої за номінальну, що призведе до збільшення струму в робочому режимі і зростанні втрат. На додаток до цього, суперконденсатори меншої ємності мають більший внутрішній опір, і тому при паралельному з'єднанні їх із акумулятором більший струм проходитиме саме через останній, що призводитиме до збільшення втрат на високому внутрішньому опорі акумулятора. При збільшенні ж ємності суперконденсатора понад раціональне значення ефект від покращення втрат буде незначний (рис. 3.22), проте зростатиме споживана енергія у зв'язку зі збільшенням маси транспортного засобу.

Раціональне значення ємності суперконденсатора залежить від енергії, яку необхідно віддати при розгоні транспортного засобу до номінальної швидкості відповідно до (3.8), а також від параметрів суперконденсаторів: внутрішнього опору та маси елемента, і повинно визначатись для кожного випадку окремо. Моделювання показало, що при використанні оптимальної конфігурації джерела живлення можна зменшити спожиту в колі енергію на 3,89%, в той час як включення суперконденсатора випадкової ємності може дати покращення енергоефективності, скажімо, на 2,86%.

3.4.3 Дослідження залежності енергоефективності кола з перетворювачем постійного струму від ємності суперконденсатора

Описані вище дослідження проводилися у електричному колі, у якого джерело живлення підключалось до навантаження без зміни напруги. Таке коло є зручним та максимально енергоефективним, якщо його можливо реалізувати. Але дуже часто в електричних транспортних засобах з автономним живленням

використовуються джерело живлення пониженої напруги, яке підключається до перетворювача постійного струму (ППС), що підвищує цю напругу до рівня, необхідного для живлення електродвигуна (рис. 3.25).

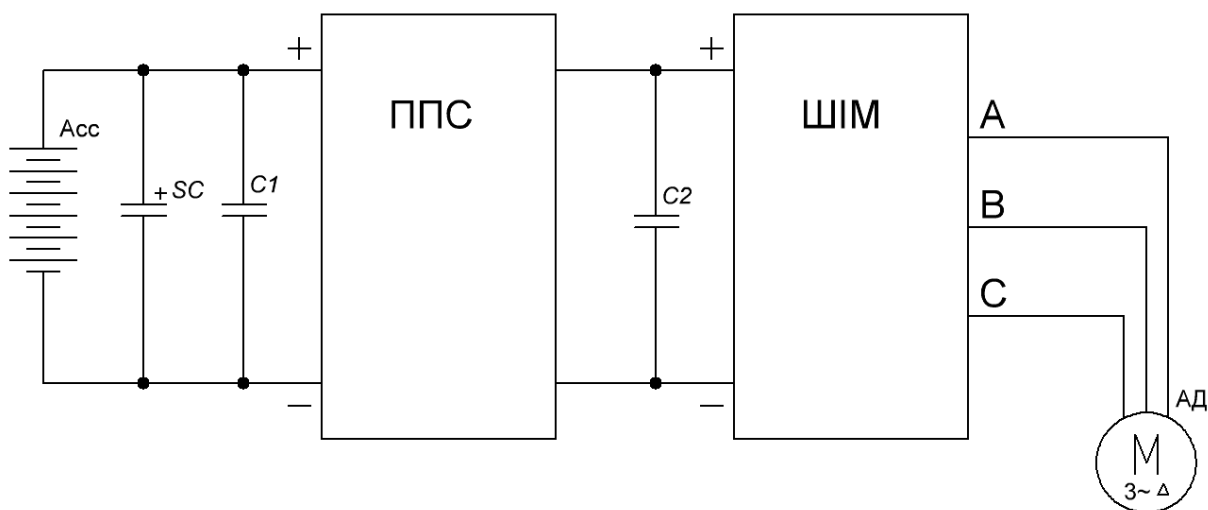


Рисунок 3.25 – Схема електричного кола електроскутера з перетворювачем постійного струму

На цій схемі позначено:

Асс – акумуляторна батарея;

SC – батарея суперконденсаторів;

C1, C2 – конденсатори, які використовуються у якості фільтра;

ППС – підвищуючий перетворювач постійного струму;

ШІМ – інвертор з ШІМ, який перетворює постійну напругу в трифазну змінну за законом векторного керування;

АД – асинхронний двигун з короткозамкненим ротором.

Недоліком даної схеми є те, що вона містить додатковий елемент – перетворювач постійного струму – на якому виділяються втрати електричної енергії. Тим не менше, така схема є дуже розповсюдженою, адже вона дозволяє суттєво знизити необхідну напругу джерела живлення і, таким чином, сильно спростити її конфігурацію та зменшити геометричні розміри. Це може

відігравати суттєву роль в транспортних засобах, особливо невеликих, як електроскутер.

Для дослідження був вибраний універсальний реверсивний перетворювач постійного струму Maxi Family марки Vicor з наступними параметрами:

- вхідна напруга: 250 – 425 В;
- вихідна напруга: 24 В;
- номінальна потужність: 600 Вт;
- номінальний ККД: 0.905;
- постійні втрати: 2,4 Вт;
- похибка напруги: до 2%;
- маса: 29.2 г.

Для встановлення необхідної потужності було взято три такі перетворювачі, підключені паралельно.

Визначимо необхідні параметри джерела живлення. Напруга, відповідно до перетворювача постійного струму, складатиме 24 В. Із міркувань того, що нам необхідно мати ту ж саму накопичену енергію, як і у варіанті без ППС, можна вирахувати необхідну ємність акумулятора:

$$\begin{aligned}
 W_1 &= W_2 \\
 Q_1 \cdot U_1 &= Q_2 \cdot U_2 \\
 Q_2 &= \frac{Q_1 \cdot U_1}{U_2} = \frac{1.18 \cdot 373}{24} = 18.3 \text{ А} \cdot \text{год}
 \end{aligned} \tag{3.17}$$

де W_1 , W_2 – необхідна накопичена енергія акумулятора для схем без ППС та з ППС відповідно;

$U_1 = 373 \text{ В}$ – напруга акумуляторної батареї для схеми без ППС;

$U_2 = 24 \text{ В}$ – необхідна напруга акумуляторної батареї для схеми з ППС;

$Q_1 = 1.18 \text{ А} \cdot \text{год}$ – ємність акумуляторної батареї для схеми без ППС;

Q_2 – необхідна ємність акумуляторної батареї для схеми з ППС.

В якості джерела живлення була вибрана батарея літій-іонних акумуляторів марки Noncell HCP603650NZC (як і в попередньому випадку) з наступними параметрами:

- напруга – 3,7 В;
- ємність – 1,9 А·год;
- внутрішній опір – 0,13 Ом;
- маса – 21 г.

Для встановлення необхідної напруги та ємності батарея складатиметься із 13 паралельних та 7 послідовних ланок. Таким чином, параметри самої батареї:

- напруга – 25,9 В;
- ємність – 24,7 А·год;
- внутрішній опір – 0,07 Ом;
- маса – 1,911 кг.

Аналогічним чином вибирається і батарея суперконденсаторів. Необхідна напруга складатиме 25,9 В. Оцінково необхідна ємність дорівнює:

$$\begin{aligned}
 W_1 &= W_2 \\
 \frac{c_1 \cdot U_1^2}{2} &= \frac{c_2 \cdot U_2^2}{2} \\
 c_2 &= \frac{c_1 \cdot U_1^2}{U_2^2} = \frac{0.65 \cdot 373^2}{25.9^2} = 135\Phi
 \end{aligned}
 \tag{3.18}$$

де $U_2 = 25.9 \text{ В}$ – напруга акумуляторної батареї для схеми з ППС;

$c_1 = 0.65 \Phi$ – оцінково необхідна ємність суперконденсатора для схеми без ППС;

c_2 – оцінково необхідна ємність суперконденсатора для схеми з ППС.

Для отримання необхідних параметрів використовуватиметься батарея із 10-ти послідовно з'єднаних суперконденсаторів серії Maxwell K2Series із наступними параметрами:

- номінальна напруга – 2.7 В;
- ємність – 650, 1200, 1500, 2000 Ф;
- внутрішній опір – 0.8, 0.58, 0.47, 0.35 мОм;
- маса – 160, 260, 280, 360 г.

Для досліджень батареї складатимуться таким чином, аби отримати результуючу ємність, що змінюється від 65 до 265 Ф.

Завдяки пониженню напруги вдалось визначити більш вдалу конфігурацію батареї суперконденсаторів. Замість 138-ми елементів тепер використовуватимуться лише 10, кожен з яких матиме на порядок вище ємність. Таким чином, ефективність використання суперконденсаторів має бути збільшена.

Взявши до уваги схеми заміщення перетворювача постійного струму (рис. 2.15) та нелінійного електричного кола (рис. 3.8), можна побудувати схему заміщення для даного кола (рис. 3.26). Параметри цієї схеми визначаються з рівнянь, наведених в розділі 2.

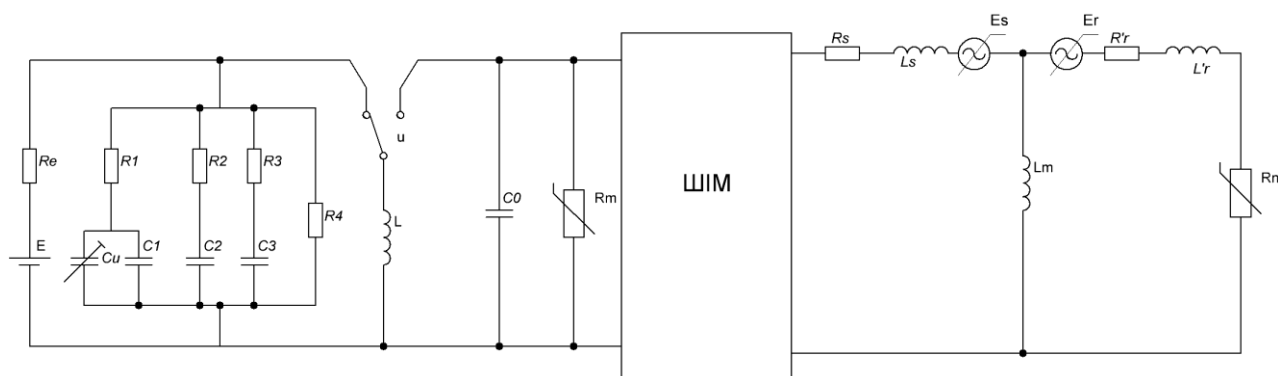


Рисунок 3.26 – Спрощена заступна схема електричного кола електроскутера з урахуванням магнітних втрат та з перетворювачем постійного струму

Дослідження електричного кола проводились шляхом моделювання в програмному пакеті Matlab/Simulink. Як і попередня, це коло досліджувалось на виконання міського їздового циклу. Залежність струму акумулятора від часу

при використанні в якості джерела живлення виключно акумуляторної батареї, зображено на рис. 3.27.

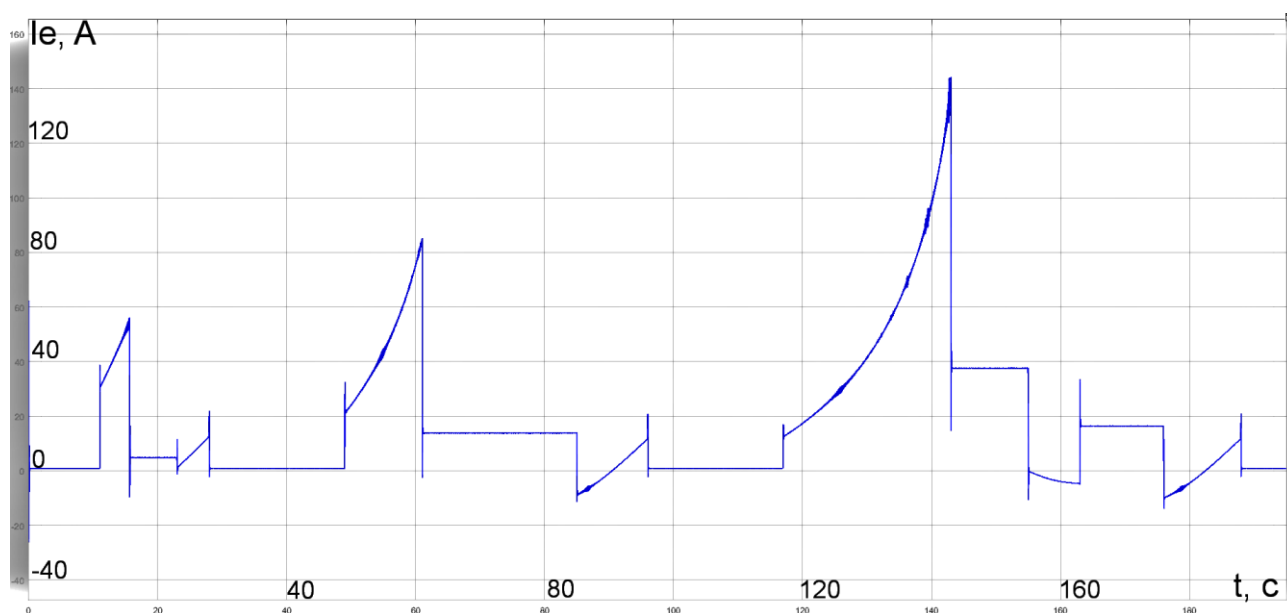


Рисунок 3.27 – Залежність струму акумулятора від часу при використанні в якості джерела живлення виключно акумуляторної батареї

Використавши цю залежність в формулах (3.13-3.14) можна обрахувати загальну спожиту за міський цикл енергію. Вона складає 82174 Дж. Це на 8,6% більше, ніж при підключенні джерела безпосередньо до інвертора з ШІМ без перетворювача постійного струму (в такому випадку спожита енергія складала 75638 Дж). Це пояснюється втратами на самому перетворювачі постійного струму, ККД якого складає лише 90,5%. Середній ККД за цикл такого привода, визначений за допомогою рівняння (3.15), склав 0,368 (для порівняння, без ППС він був 0,400).

Такий результат підтверджує припущення, що у випадках, коли можливо зібрати схему не використовуючи ППС, ліпше це робити саме так. Коли ж через конструктивні особливості єдиною можливістю є поставити джерело нижчої напруги, то у такій схемі виникають ті ж самі проблеми, що і при живленні напряму: високі пікові струми під час розгону та гірша рекуперація. Шлях до вирішення цих проблем аналогічний: використання паралельно підключеного до акумулятора суперконденсатора.

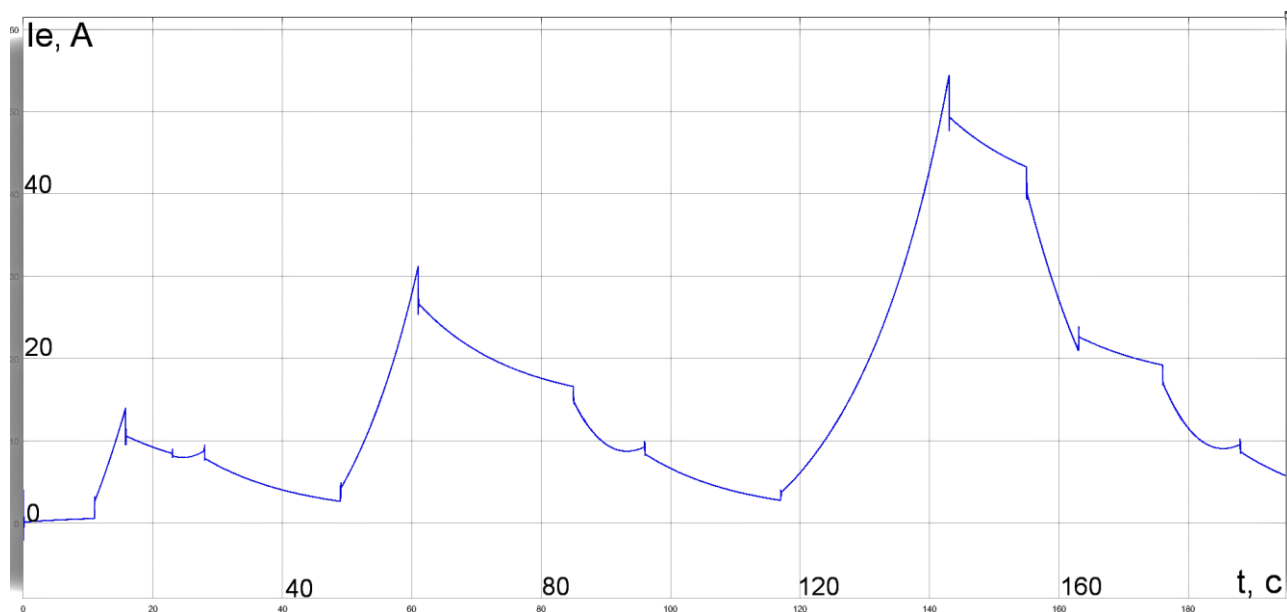


Рисунок 3.28 – Залежність струму через акумулятор від часу при ємності суперконденсатора 120 Ф

Для прикладу суперконденсаторної батареї, що складається з 10-ти послідовно з'єднаних суперконденсаторів Maxwell K2Series ємність 1200 Ф кожен (ємність батареї – 120 Ф), можна зобразити зміну струму через джерело живлення (рис. 3.28).

Як видно з графіку, піковий струм через акумулятор вдалося зменшити приблизно в 2.6 рази, що суттєво зменшує втрати на внутрішньому опорі акумулятора. Як і у випадку прямого живлення, на акумуляторі більше не спостерігається «пауз»: він працює як не на двигун, то на дозарядку суперконденсатора. Рекуперація ж проходить на суперконденсаторі, який має суттєво менший опір, аніж акумулятор (рис. 3.29).

Використовуючи формулу (3.16) можна знайти загальну спожиту за цикл енергію за такого живлення. Вона склала 78440 Дж, що на 4,54% менше, ніж без суперконденсатора. Визначений за формулою (3.15) ККД склав 0,391.

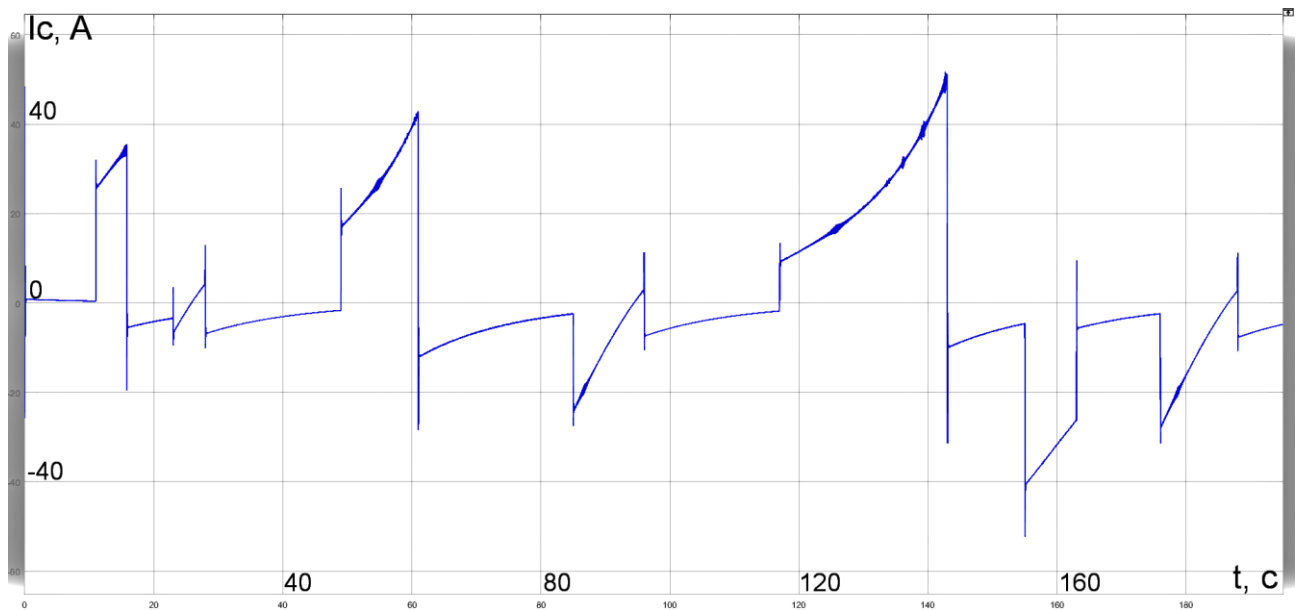


Рисунок 3.29 – Залежність струму через суперконденсатор від часу при ємності суперконденсатора 120 Ф

Аналогічні моделювання та розрахунки були проведені і для інших ємностей. Результати занесені в табл. 3.8.

Таблиця 3.8 – Дослідження енергоефективності кола з ППС в залежності від ємності суперконденсатора

с, Ф	W1, Дж	dW, %	W2, Дж	ККД
0	82174		30272	0,3684
65	79142	3,690	30505	0,3854
120	78440	4,544	30651	0,3908
150	78039	5,032	30681	0,3931
200	77989	5,093	30798	0,3949
265	78650	4,288	31091	0,3953

де c – ємність батареї суперконденсаторів;

W_1 – спожита в колі за цикл енергія;

$dW = W_1/W_{c=0} \cdot 100\%$ – зменшення споживаної енергії;

W_2 – корисна енергія;

ККД – коефіцієнт корисної дії.

Залежність ККД від ємності суперконденсатора зображена на рис. 3.30.

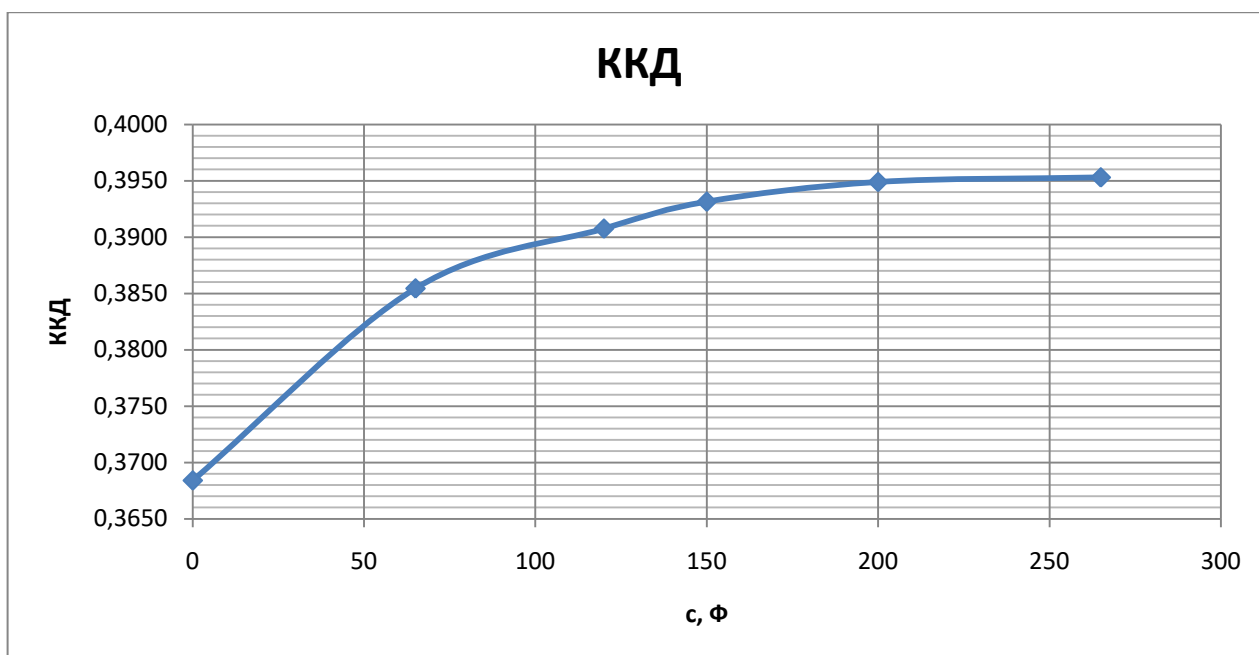


Рисунок 3.30 – Залежність ККД кола з ППС від ємності суперконденсатора

Я видно з цього рисунку, аналогічно до попереднього випадку, чим більша ємність суперконденсаторної батареї, тим кращий ККД електропривода. Порівнявши результати на рис. 3.30 та 3.23 можна зробити висновок, що у випадку з ППС видиме покращення ККД спостерігається при сильнішому збільшенні ємності, а «насичення» енергоефективності відбувається за ємності 200 Ф, що перевищує оцінково необхідну (135 Ф). Це можна пояснити тим, що для нижчого значення напруги джерела живлення вдалось підібрати якісніші суперконденсатори з меншим внутрішнім опором, внаслідок чого вдалось отримати сильніший ефект.

Залежність же основного показника енергоефективності транспортного засобу – спожитої за міський їздовий цикл енергії – від ємності суперконденсатора зображена на рис. 3.31.

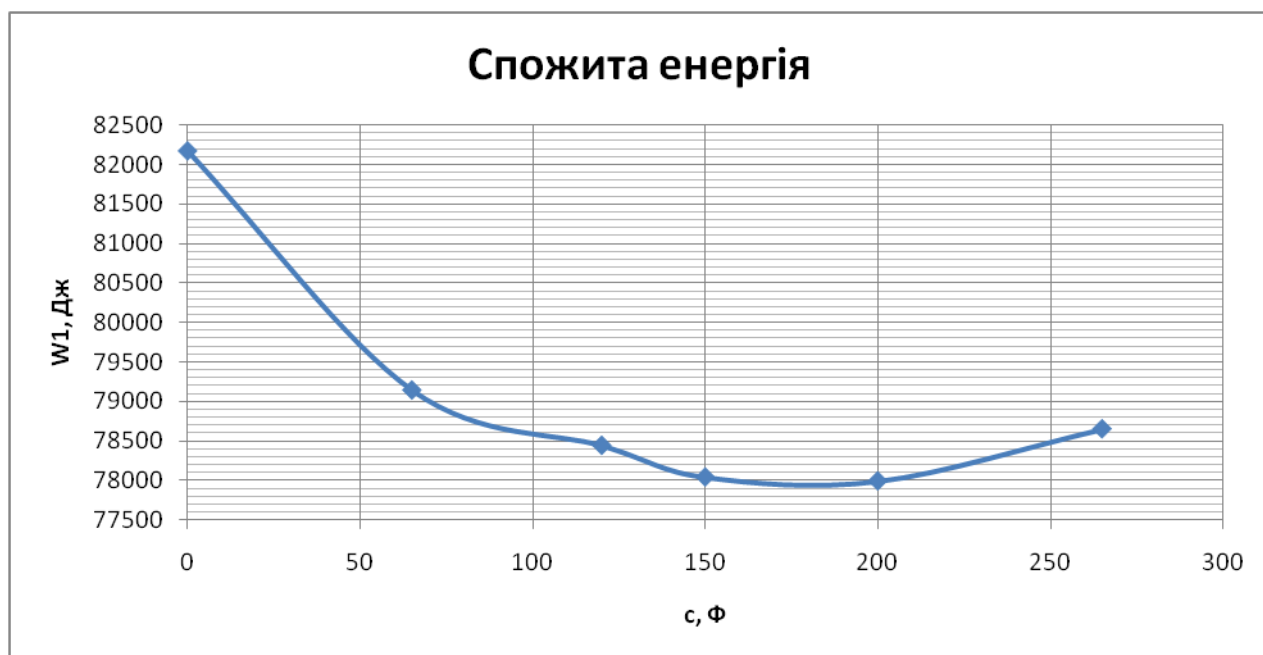


Рисунок 3.31 – Залежність спожитої за міський їздовий цикл енергії у колі з ППС від ємності суперконденсатора

Як видно з цього рисунку, мінімальна спожита енергія, яка склала 77989 Дж, спостерігається при ємності суперконденсаторної батареї також 200 Ф. При цій ємності вдалось досягти зменшення споживання енергії на 5,09%. Для порівняння, без використання ППС найефективніше покращення становило 3,89%. Така різниця так само пояснюється вищою якістю та меншим внутрішнім опором суперконденсаторів. Чим менший їхній внутрішній опір, тим більше струму при живленні двигуна протікатиме саме через них, а не через паралельно підключену акумуляторну батарею, а тому і втрати на внутрішньому опорі акумуляторів будуть меншими.

Варто зауважити, що на відміну від попередньої схеми, оптимальне значення ємності суперконденсатора виявилось інакшим, аніж оцінково необхідне: 200 Ф замість розрахованих 135 Ф. При підвищеній ємності суперконденсатор не встигатиме сильно розрядитись за час розгону та підтримуватиме високий рівень напруги джерела, зменшуючи струм (рис. 3.32).

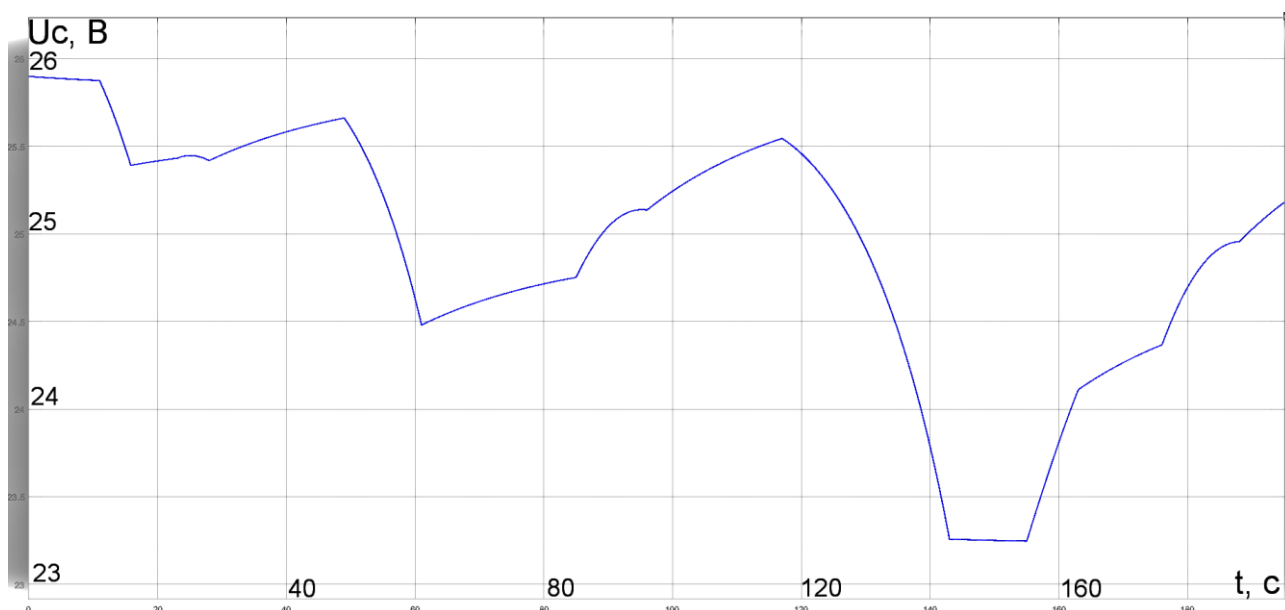


Рисунок 3.32 – Залежність напруги на суперконденсаторі від часу при ємності суперконденсатора 200 Ф

Дослідження кола з джерелом високої напруги показували, що дана перевага суперконденсатора високої ємності не перекривала недолік у його надмірній вазі. Проте при використанні перетворювача постійного струму та джерела більш низької напруги вдалося підібрати суперконденсатори з кращим параметром питомої енергії, а тому і з меншою масою. Як результат, стало доцільним використання більшої ємності та можливим сильніше покращення енергоефективності – до 5,09%.

Порівняти ефективність використання суперконденсаторів у колах з перетворювачем постійного струму та без нього можна привівши ємності суперконденсаторів до оцінково необхідних в обох випадках. Саме це порівняння зображене на рис. 3.33.

Тут $dW = W_l/W_{c=0} \cdot 100\%$ – зменшення споживаної енергії у порівнянні з колом без суперконденсатора;

c – ємність батареї суперконденсаторів;

c_0 – оцінково необхідна ємність батареї суперконденсаторів для даного кола.

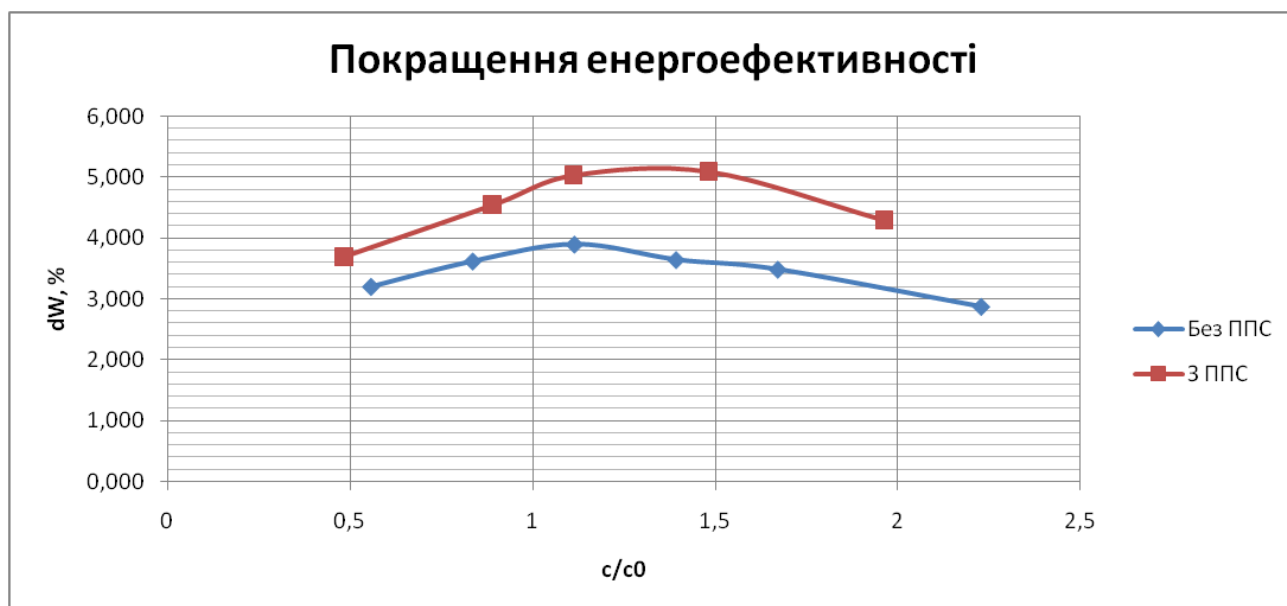


Рисунок 3.33 – Залежність зменшення спожитої енергії у порівнянні з колом без використання суперконденсатора для випадків використання перетворювача постійного струму та без нього

3.5 Висновки до розділу

1. У електричному колі для дослідження енергоефективності перетворення енергії на прикладі кола електроскутера в якості автономного джерела живлення використовується батарея літій-іонних акумуляторів із можливістю паралельного підключення батареї суперконденсаторів. Регульованим електромеханічним перетворювачем в цьому колі є асинхронний двигун з векторною системою керування швидкістю та магнітним потоком.

2. У розробленій заступній схемі нелінійного електричного кола з автономним регульованим електромеханічним перетворювачем за допомогою нелінійного резистора враховуються магнітні втрати в магнітопроводі перетворювача.

3. Адекватність розробленої в розділі 2 математичної моделі нелінійного електричного кола з автономним регульованим електромеханічним перетворювачем підтверджена на експериментальній установці.

4. Найбільша ефективність перетворення енергії у колі досягається при номінальному значенні магнітного потоку електромеханічного перетворювача

незалежно від зміни навантаження. На відміну від відомих стратегій зміни магнітного потоку при зміні навантаження при живленні кола від мережі великої потужності пониження магнітного потоку внаслідок великого електричного опору автономного джерела живлення призводить до зростання втрат енергії.

5. Існує певне раціональне значення ємності суперконденсатора, за якого споживання електроенергії в колі є мінімальним. Суперконденсатори з меншою ємністю занадто сильно розряджаються при розгоні електроскутера, що призводить до роботи за пониженої напруги живлення, а значить до зростання втрат. Використання суперконденсаторів з більшою ємністю призводить до суттєвого зростання маси електроскутера, а значить і споживання енергії при розгоні та на подолання сили тертя коліс. Для заданого електричного кола електроскутера при відпрацюванні європейського міського їздового циклу ємність суперконденсатора, за якої споживання енергії є мінімальне, склала 0,725 Ф для напруги 370 В. Зменшення споживання електроенергії по відношенню до кола без суперконденсатора становить 3,89 %.

6. Існує певне раціональне значення ємності суперконденсатора також і для кола з джерелом живлення пониженої напруги. Ємність суперконденсатора, за якої спостерігалось найменше споживання електроенергії, склала 200 Ф для напруги 25,9 В, що забезпечило зменшення споживання енергії на 5,09 %.

Задля мінімізації споживання електроенергії у нелінійному електричному колі необхідно проводити дослідження залежності енергоефективності кола від ємності суперконденсатора, підключеного паралельно до акумулятора. Правильний вибір ємності суперконденсатора дозволив зменшити в електричному колі електроскутера споживання електроенергії на величину біля 5 %.

РОЗДІЛ 4

УДОСКОНАЛЕННЯ МЕТОДІВ З ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ПЕРЕТВОРЕННЯ ЕНЕРГІЇ В НЕЛІНІЙНОМУ ЕЛЕКТРИЧНОМУ КОЛІ ЗІ ЗМІННИМ НАВАНТАЖЕННЯМ

4.1 Удосконалення структури джерела живлення електричного кола на основі системи акумулятор-суперконденсатор

Результати дослідження розділу 3 показали, що використання в електричному колі раціонального значення суперконденсатора, підключеного паралельно до акумулятора, дозволяє отримати середній ККД перетворення енергії за міський їздовий цикл на рівні 42,4 %, в той час як ККД електродвигуна в номінальному режимі дорівнює 80,5 %. Як було показано, значна кількість втрат виділяється на внутрішньому електричному опорі акумулятора. Ці втрати є пропорційними до квадрату струму і визначаються за формулою:

$$W_e = \int_{t=0}^{t_u} I_e^2 \cdot R_e \cdot dt, \quad (4.1)$$

де W_e – втрати тепла на акумуляторі за міський їздовий цикл;

I_e – струм через акумулятор;

R_e – внутрішній опір акумулятора;

t_u – період міського їздового циклу.

Загальна спожита за цикл енергія є величиною майже сталою і знаходиться за формулою:

$$W_1 = \int_{t=0}^{t_u} I_e \cdot E \cdot dt, \quad (4.2)$$

де E – ЕРС джерела живлення;

W_1 – спожита за цикл енергія.

Саме значення ЕРС є сталим, спожита енергія слабо змінювана, отже, з формули (4.2) випливає, що середнє значення струму за період циклу теж є мало змінюваною величиною. При цьому, виходячи із формули (4.1), для зменшення електричних втрат на джерелі необхідно зменшити середньоквадратичне значення струму акумулятора.

З математики відомо, що при заданому середньому арифметичному чисел, чим менше відхилення кожного з них від середнього, тим менше буде і середньоквадратичне. В даному випадку це означає, що чим ближчий буде струм акумулятора в кожний момент часу до його середнього значення, тим менше буде його середнє квадратичне, і як наслідок, будуть меншими втрати.

Для дослідження вибрано електричне коло без використання перетворювача постійного струму (рис.3.6). Отримана залежність струму акумулятора від часу при відпрацюванні міського їздового циклу зображена на рис. 4.1.

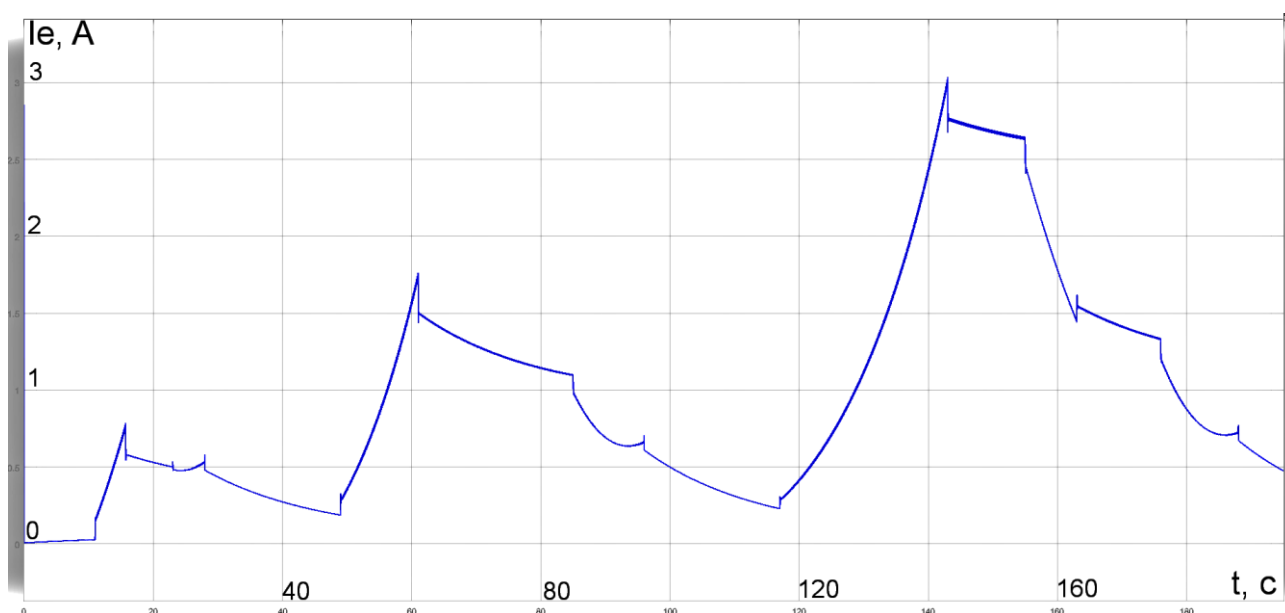


Рисунок 4.1 – Залежність струму акумулятора від часу при ємності суперконденсатора 100 Ф

Як видно з рисунку, значення струму є далеким від рівномірного: він має характерні піки та спади. Піки спостерігаються в моменти розгону

електроскутера: саме тоді потужність має найбільше значення і тому саме тоді через джерело живлення протікає найбільший струм. Зменшити в цей момент струм через акумулятор можливо підключенням суперконденсатора, що вже було досліджено. Він, маючи менший внутрішній опір, бере на себе основну частину споживаного струму. Але за період розгону суперконденсатор віддає значну частину накопиченої енергії, його напруга падає і тому під кінець розгону вже велика частина струму джерела припадає на акумулятор. Для того, аби цей струм був меншим, необхідно, аби напруга на суперконденсаторі до кінця розгону залишалась вищою, а значить, аби його ємність була більша. Але це призводить до зростання маси джерела живлення і до збільшення споживання електроенергії.

Проаналізуємо спади значення струму за період міського циклу. Вони є характерними для моментів часу, коли електроскутер не рухається, в реаліях це відповідає зупинкам на світлофорах. У ці моменти часу джерело продовжує працювати, дозаряджаючи суперконденсатор.

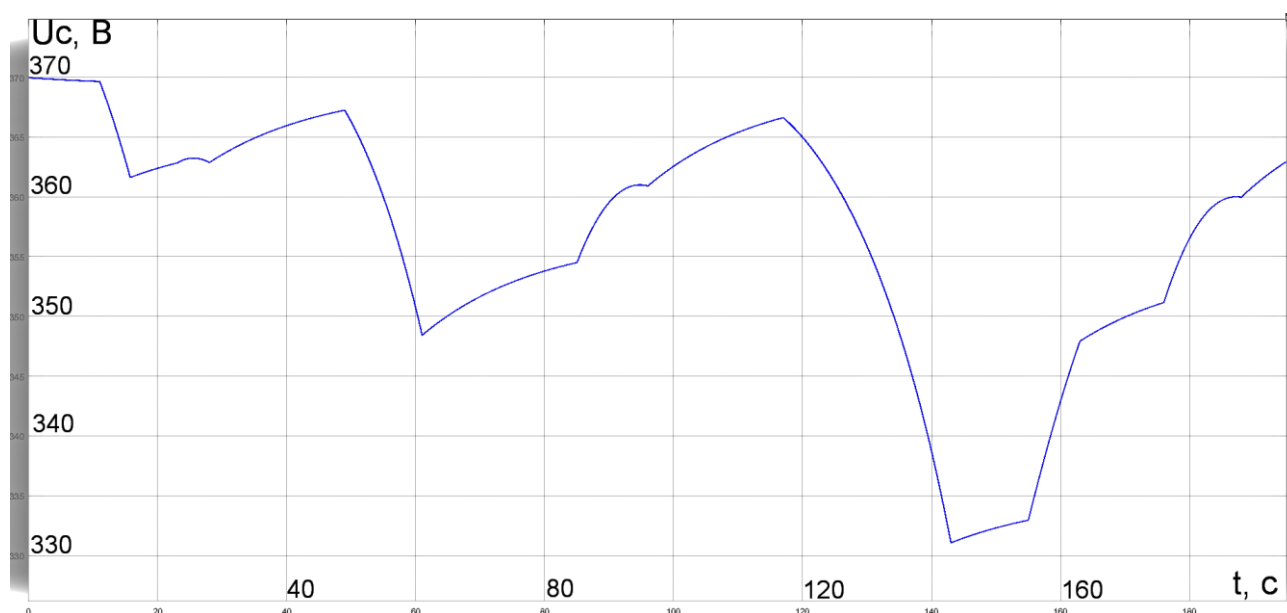


Рисунок 4.2 – Залежність напруги на батареї суперконденсаторів від часу при ємності суперконденсатора 100 Ф.

Проте, як видно з рис. 4.2, за час пауз акумулятор не встигає дозарядити суперконденсатор до його максимального значення напруги. Через це

наступний старт відбуватиметься при недозарядженому суперконденсаторі, що призведе до сильнішого спаду напруги на ньому під кінець розгону та збільшенню втрат.

Як висновок, можна припустити, що збільшення струму дозаряду суперконденсатора в моменти пауз роботи електродвигуна дозволяє підвищити значення струму під час спадів, а значить і зменшити сумарні втрати енергії за цикл. Ця ідея покладена в основу удосконалення структури джерела живлення та розробки електричної схеми дозаряду суперконденсатора.

Струм через суперконденсатор можна визначити за рівнянням, виведеним у розділі 2:

$$\begin{aligned}
 I_C &= I_1 + I_2 + I_3 + I_4 \\
 I_1 &= \left(C_1 + k_{CV} |U_C - I_1 R_1| \right) \frac{d(U_C - I_1 R_1)}{dt} \\
 I_2 &= C_2 \frac{d(U_C - I_2 R_2)}{dt} \\
 I_3 &= C_3 \frac{d(U_C - I_3 R_3)}{dt} \\
 I_4 &= \frac{U_C}{R_4}
 \end{aligned} \tag{4.3}$$

де I_i – струм i -ї гілки кола заміщення суперконденсатора.

I_C – повний струм, що протікає через суперконденсатор.

C_i – ємності i -ї гілки кола;

R_i – внутрішні опори i -ї гілки кола;

k_{CV} – коефіцієнт залежності динамічної ємності від напруги;

U_{CV} – напруга на ємності суперконденсатора.

Загалом параметри заступної схеми суперконденсатора такі, що майже в будь-яких випадках (окрім статичних режимів, коли суперконденсатор повністю заряджений або повністю розряджений) струм першої гілки кола

заміщення буде на порядок вищий за інші. А тому для оцінкових розрахунків можна розраховувати цей струм як:

$$I_c = \left(C_1 + k_{CV} |U_c - I_1 R_1| \right) \frac{d(U_c - I_1 R_1)}{dt} \quad (4.4)$$

Напруга на ємності суперконденсатора визначається за формулою:

$$U_c = E - I_e \cdot (R_e + R_1), \quad (4.5)$$

де E – ЕРС акумулятора;

I_e – струм через акумулятор; в моменти пауз двигуна, коли він не споживає енергію, $I_e = I_1$;

R_e – внутрішній опір акумулятора.

Таким чином, струм дозаряду суперконденсатора можна також визначити як:

$$I_1 = \frac{E - U_c}{R_e + R_c}, \quad (4.6)$$

де R_c – внутрішній опір суперконденсатора.

У формулі (4.6) єдиною несталою величиною є напруга на ємності суперконденсатора. Отже, для того, аби збільшити струм дозаряду, необхідно понизити напругу на суперконденсаторі.

З технологічної точки зору, це можливо реалізувати, маючи батарею послідовно з'єднаних суперконденсаторів. Таку батарею слід розбити на дві однакові за кількістю елементів частини. Тоді в моменти дозаряду можна буде змінити підключення цих частин із послідовного на паралельне (рис. 4.3).

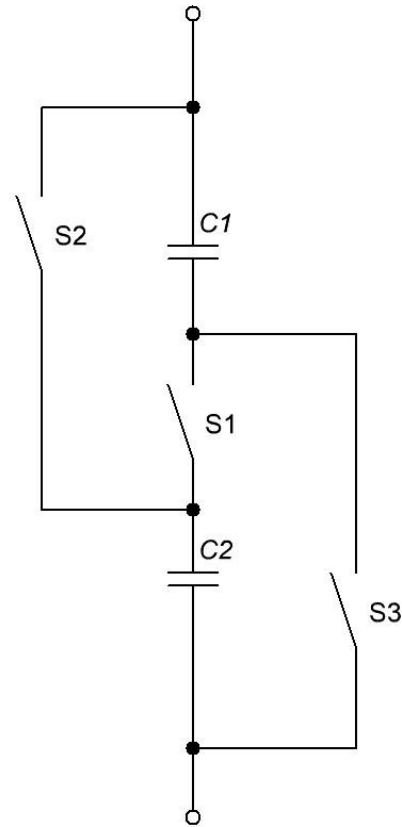


Рисунок 4.3 – Схема підключення суперконденсаторної батареї у коло з можливістю переключення для дозаряду

На цій схемі $C1$ та $C2$ – дві однакові половинки батареї суперконденсаторів, S_i – електричні ключі. В нормальному робочому режимі ключі $S2$ та $S3$ розімкнені, а ключ $S1$ – замкнений. Таким чином половинки батареї з'єднані послідовно. В режимі дозаряду ключ $S1$ буде розімкнений, а ключі $S2$ та $S3$ навпаки замкнені, і таким чином половинки батареї будуть з'єднані паралельно.

Таке переключення призведе до того, що напруга на суперконденсаторі впаде вдвічі. Окрім того, його ємність зросте в 4 рази та внутрішній опір зменшиться також в 4 рази. В такому разі струм дозаряду буде дорівнювати:

$$I'_1 = \frac{E - U_c / 2}{R_e + R_c / 4} \quad (4.7)$$

Якщо підставити відомі значення, а саме ЕРС джерела – 370 В, напруга розрядженого суперконденсатора – 330 В, то видно, що використавши таке переключення чисельник формули для визначення струму зросте більш ніж в 6 разів. Враховуючи те, що знаменник ще й зменшиться, ми отримується занадто велике збільшення струму дозаряду суперконденсатора, яке може не тільки викликати збільшені втрати, що є протилежністю до задачі, але й вивести з ладу акумулятор. Очевидно, що цей струм необхідно обмежити. Цього можна досягти шляхом використання ШІМ ключів та L-фільтру. Причому в якості ключів для ШІМ можна застосовувати вже існуючі в схемі ключі $S2$ та $S3$ (рис. 4.4).

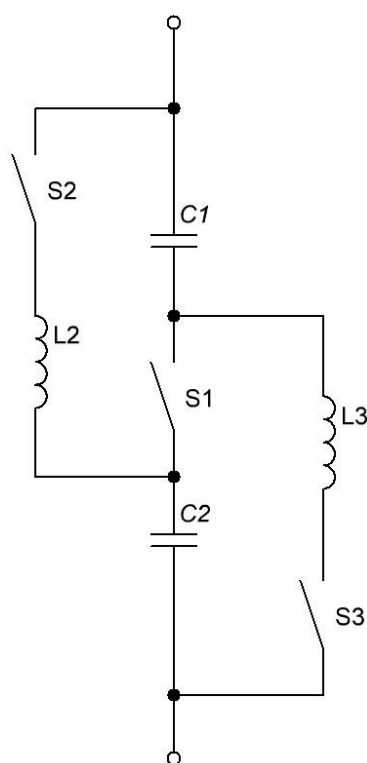


Рисунок 4.4 – Схема підключення суперконденсаторної батареї в коло з можливістю переключення для дозаряду та обмеження струму дозаряду

Звісно, зазвичай індуктивності мають значний внутрішній опір та масу, але використовуючи високочастотну ШІМ, а також враховуючи наявність ємнісної складової, необхідна значення індуктивності L-фільтру буде достатньо

незначною, аби додаткові опір та маса не вплинули на ефективність електроскутера.

Для визначення значення струму дозаряду, до якого буде обмежувати ШІМ, використовується припущення, що суперконденсатор має рівномірно заряджатись протягом певного часу паузи t_n до свого початкового значення напруги. В такому разі значення струму дозаряду можна визначити із різниці накопичених на суперконденсаторі зарядів:

$$I_1' = \frac{(k_{CV} \cdot k_{cn} \cdot E + C_1) \cdot k_{cn} \cdot E - (k_{CV} \cdot U_1 + C_1) \cdot U_1}{t_n}, \quad (4.8)$$

де I_1' – струм дозаряду, до якого обмежує ШІМ;

$k_{cn} \approx 0,995$ – коефіцієнт спаду напруги, який враховує спад напруги на акумуляторі під час пауз (на підтримання збудження двигуна);

U_1 – значення напруги перед початком паузи;

t_n – тривалість паузи.

Варто зазначити, що для правильної роботи ШІМ тривалість паузи має бути передбаченою ще до початку дозаряду. Звісно, точно не можна знати, скільки транспортний засіб буде стояти на світлофорі чи в іншому місці. Проте можна використовувати середнє очікуване значення паузи, тобто те, скільки в середньому зазвичай він стоятиме. Для міського їздового циклу можна взяти $t_n=20$ с. При впровадженні такої системи у використання, у кожному транспортному засобі цей час може виставлятися індивідуально та автоматично адаптуватись під кожного водія та його середовища. Окрім того, струм дозаряду також мусить бути обмежена певним значенням – номінальним струмом акумулятора аби не зашкодити джерелу живлення.

4.2 Аналіз енергоефективності електричного кола електроскутера при відпрацюванні міського їздового циклу з використанням системи дозаряду суперконденсатора

За методикою, описаною в розділі 3, проведено дослідження в програмному пакеті Matlab/Simulink комп'ютерної моделі електричного кола електроскутера.

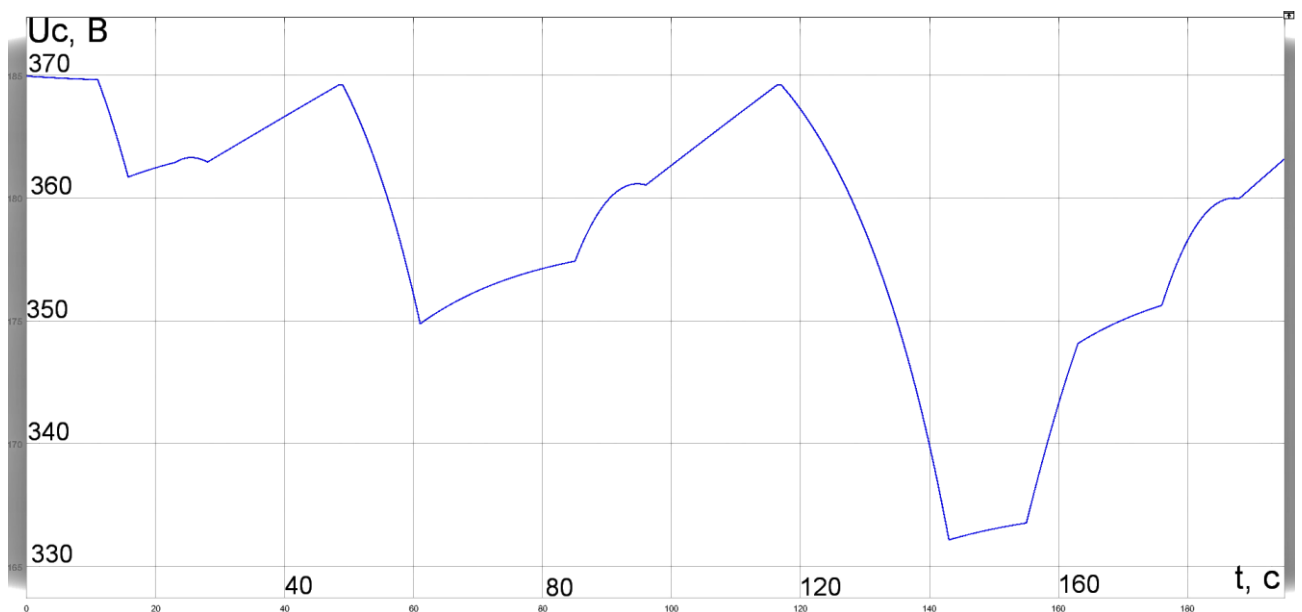


Рисунок 4.5 – Залежність напруги на батареї суперконденсаторів від часу при ємності суперконденсатора 100 Ф та використанні системи дозаряду

На рис. 4.5 показана залежність напруги конденсатора від часу за міський їздовий цикл при впровадженні запропонованої системи. Порівнявши результати на рис. 4.2, у якому зображена залежність напруги на суперконденсаторі при тих самих умовах, але без системи дозаряду, то видно, що запропонована система має позитивний ефект. Суперконденсатор встигає дозарядитись до значення напруги на акумуляторі під час пауз руху, внаслідок чого напруга на ньому під кінець розгону залишається дещо вищою. Процес дозаряду відбувається майже лінійно. Певна нелінійність існує у зв'язку з нелінійністю самого суперконденсатора та залежністю його ємності від напруги

на обкладках, але при незначних змінах напруги, як в даному випадку, ця нелінійність є візуально непомітною.

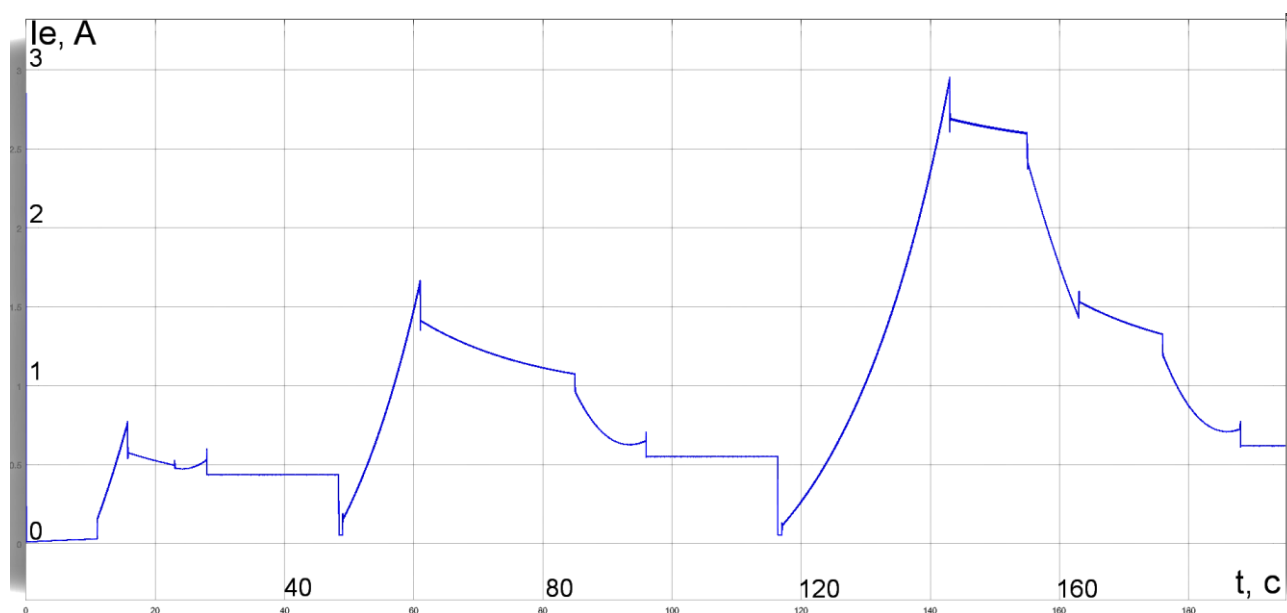


Рисунок 4.6 – Залежність струму через акумулятор від часу при ємності суперконденсатора 100 Ф та використанні системи дозаряду

На рис. 4.6 зображена залежність струму через акумулятор від часу при використанні системи дозаряду суперконденсатора. Порівнявши його з рис. 4.1, на якому зображений струм через акумулятор для тих самих умов, але без системи дозаряду суперконденсатора, видно, що поставлена задача виконана: струм під час спадів підвищений, а під час піків зменшений, тобто став більш рівномірний. Максимальний струм через акумулятор зменшився з 3,1 А до 2,9 А. Це призводить до покращення енергоефективності електричного кола, а також до збільшення тривалості експлуатації акумуляторної батареї.

Використовуючи формули (3.16) та (3.15) можна знайти спожиту за цикл енергію та ККД. Спожита енергія склала 72610 Дж, а ККД – 0,423, економія енергії порівняно з чисто акумуляторним живленням – 4,00 %. Для порівняння без системи дозаряду ці значення склали 72695 Дж, 0,422 та 3,89 % відповідно.

Отже, використання системи дозаряду суперконденсатора покращує енергоефективність електричного кола транспортних засобів. Для її

використання необхідно мати батарею суперконденсаторів, розділену на дві однакові послідовні частини, електронні ключі для керування переключенням цієї батареї, систему керування ШІМ цими ключами та L-фільтр. Це може здатись великими вкладеннями заради економії у лише 0,11%, проте насправді всі ці елементи і так мусять бути наявними у батареї суперконденсаторів. При використанні такої батареї завжди варто передбачити процес заряду суперконденсатора з нуля. Його не можна заряджати прямим включенням, адже струми будуть дуже великі і шкідливі практично для будь якого джерела, будь то акумулятор чи затискач електромережі. Тому всі елементи, необхідні до впровадженої системи дозаряду суперконденсатора, і без того будуть наявні в системі живлення електроприводу. Все, що необхідно додати, – це систему керування ШІМ, на якій буде запрограмоване рівняння (4.8) для визначення струму дозаряду під час пауз. Таким чином, отримується зменшення втрат та покращення енергоефективності електричного кола практично за відсутності матеріальних витрат.

Аналогічні дослідження були проведені і для інших значень ємності суперконденсатора. Результати занесені до табл. 4.1.

Таблиця 4.1 – Дослідження енергоефективності електропривода в залежності від ємності суперконденсаторної батареї при наявності системи дозаряду суперконденсатора та без неї.

с, Ф	W1, Дж		dW, %		W2, Дж	ККД	
	без д/з	з д/з	без д/з	з д/з		без д/з	з д/з
0,000	75638				30286	0,4004	
0,362	73223	73239	3,193	3,172	30511	0,4167	0,4166
0,543	72906	72856	3,612	3,678	30641	0,4203	0,4206
0,725	72695	72610	3,891	4,003	30707	0,4224	0,4229
0,906	72888	72779	3,636	3,780	30836	0,4231	0,4237
1,087	73009	72902	3,476	3,617	30932	0,4237	0,4243
1,449	73473	73432	2,862	2,917	31128	0,4237	0,4239

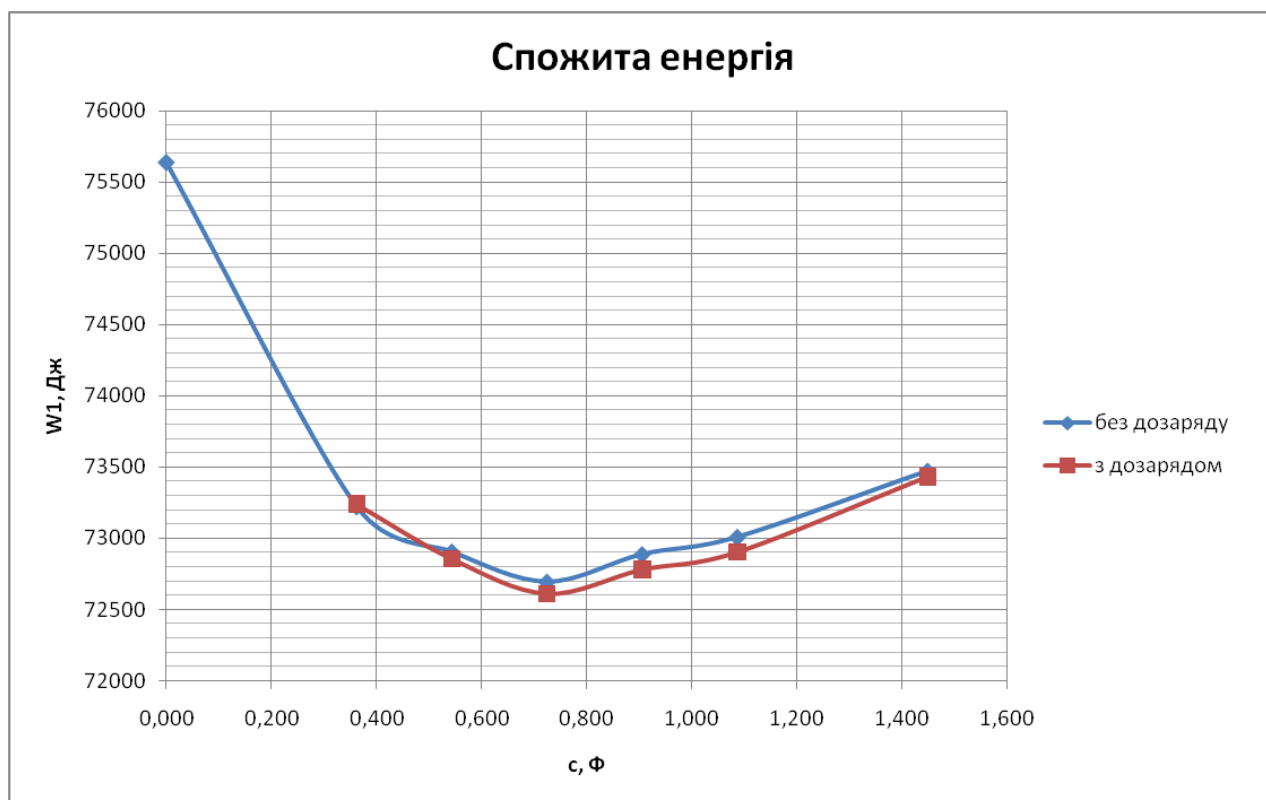


Рисунок 4.7 – Залежність спожитої за цикл енергії від ємності суперконденсатора за наявності системи дозаряду суперконденсатора та без неї

На рис. 4.7 зображене порівняння спожитої за цикл енергії від ємності суперконденсатора за наявності системи дозаряду суперконденсатора та без неї. Як видно, загалом графік залежності має той самий характер і раціональна ємність залишилась незмінна – 0,725 Ф (або ємність одного суперконденсатора – 100 Ф). Використання системи дозаряду дає покращення майже для кожної точки, але все ж таки в різній мірі. При малих ємностях суперконденсатор встигає дозарядитись до початкової напруги під час пауз і без використання системи (рис. 4.8), тому все, що вона робить – це вирівнює значення струму дозаряду із експоненційного у лінійний. В такому випадку різниця спожитої енергії при використанні системи та без неї склала лише 0,02%. Більше того, при найнижчій досліджуваній ємності – 0,362Ф – використання системи з дозарядом суперконденсатора призвело навпаки до невеликого збільшення споживання енергії. Це спричинено тим, що при такій ємності суперконденсатор і так повністю встигає дозарядитись під час пауз, проте

індуктивності L-фільтру, використані для реалізації схеми, спричинили додаткові втрати на власних активних опорах.

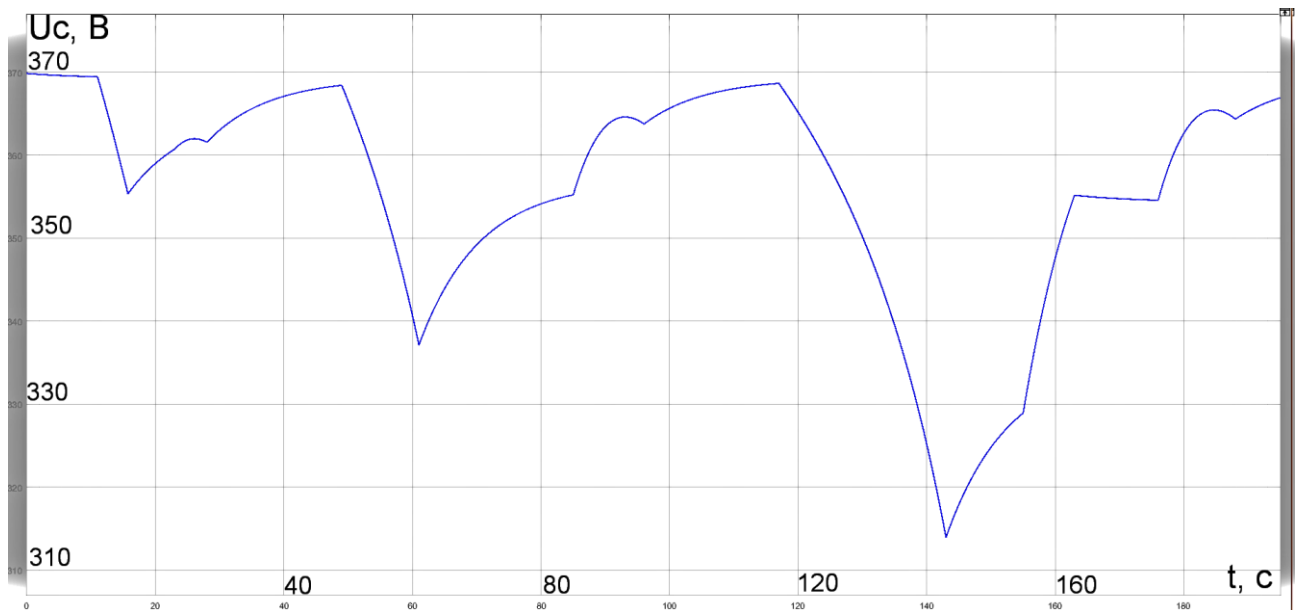


Рисунок 4.8 – Залежність напруги на батареї суперконденсаторів від часу при ємності суперконденсатора 50 Ф без використання системи дозаряду

При середніх значеннях ємностей система демонструє вже помітніше зменшення спожитої енергії. Найкращий показник має місце при $c=0,906$ Ф ($c_I=125$ Ф). При такій ємності використання системи дозаряду суперконденсатора дозволяє зекономити додаткові 0,144% спожитої енергії.

При збільшенні ємності, однак, цей показник знову став погіршуватись. Справа в тому, що при дуже великій ємності суперконденсатора для того, аби він встиг зарядитись до початкового значення напруги за обмежений час паузи руху, необхідне високе значення струму дозаряду. Це значення може навіть перевищувати середнє значення струму за міський їздовий цикл, таким чином збільшуючи його дисперсію та середнє квадратичне значення (рис. 4.9). Цей недолік, звісно, можна поправити. Можна визначити середнє значення струму через акумулятор за весь міський їздовий цикл:

$$I_{сер} = \frac{1}{t_u} \int_{t=0}^{t_u} I_e \cdot dt, \quad (4.9)$$

де $t_u = 195$ с – тривалість міського їздового циклу.

Після цього струм дозаряду буде вибиратись найменшим зі струмів, отриманих за формулами (4.8) та (4.9). Проте, це не є суттєвим для дослідження, адже значення спожитої енергії при таких великих ємностях вже точно переважає раціональне, і навряд чи виникне необхідність їх використовувати.

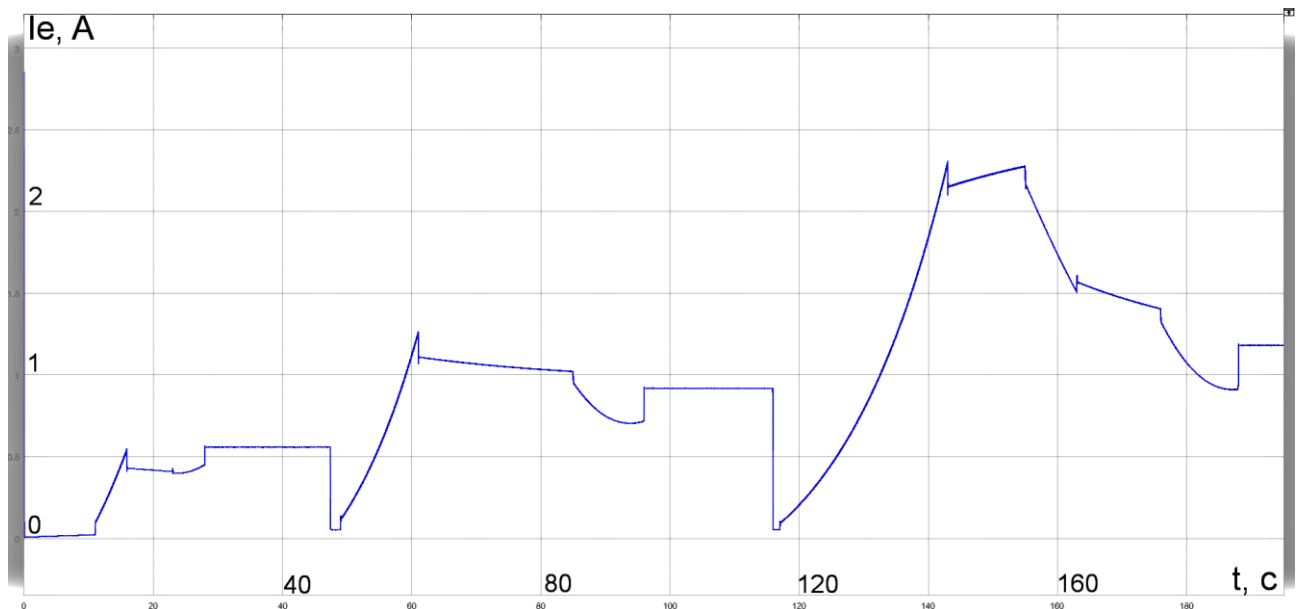


Рисунок 4.9 – Залежність струму через акумулятор від часу при ємності суперконденсатора 150 Ф при використанні системи дозаряду

Отже, використання системи дозаряду зменшує втрати в джерелі живлення електричного кола та покращує енергоефективність електроприводу. Найбільш ефективно ця система працює у точках, близьких до раціонального

значення ємності суперконденсатора. Залежність зменшення споживання електроенергії від ємності суперконденсатора при використанні системи дозаряду та без неї зображена на рис. 4.10.

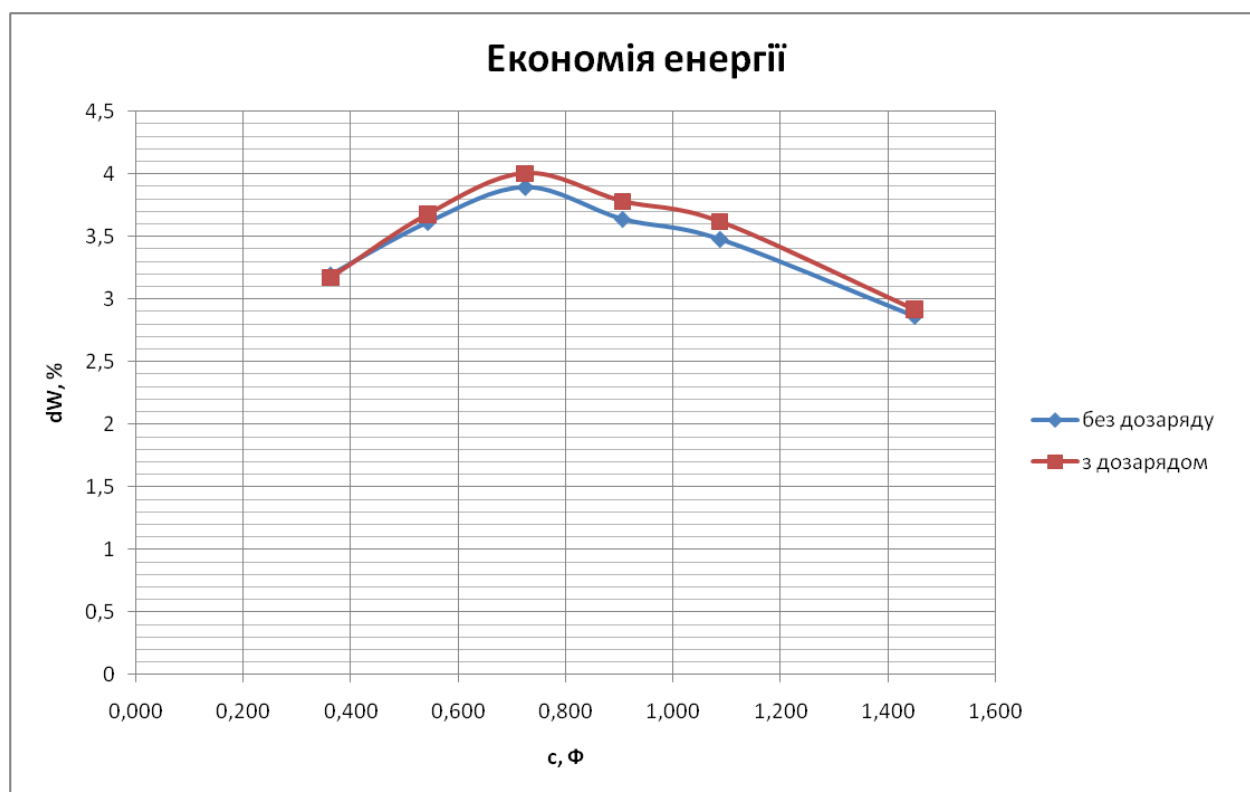


Рисунок 4.10 – Залежність зменшення споживання електроенергії від ємності суперконденсатора при використанні системи дозаряду та без неї

4.3 Аналіз енергоефективності електричного кола електроскутера при відпрацюванні міського їздового циклу з використанням системи дозаряду суперконденсатора та при застосуванні джерела пониженої напруги

Як вже було описано в розділі 3, використання джерела з рівнем напруги, відповідним до номінальної напруги електромеханічного перетворювача енергії, може бути незручно або взагалі неможливо. У таких випадках використовується джерело пониженої напруги та перетворювач постійного струму. В такому варіанті схеми електричного кола також можливе застосування системи дозаряду суперконденсатора.

Розглянемо напругу на суперконденсаторі для ємності, найближчої до знайденої в розділі 3 оцінково необхідної ємності батареї $c = 135 \text{ Ф}$ (рис. 4.11).

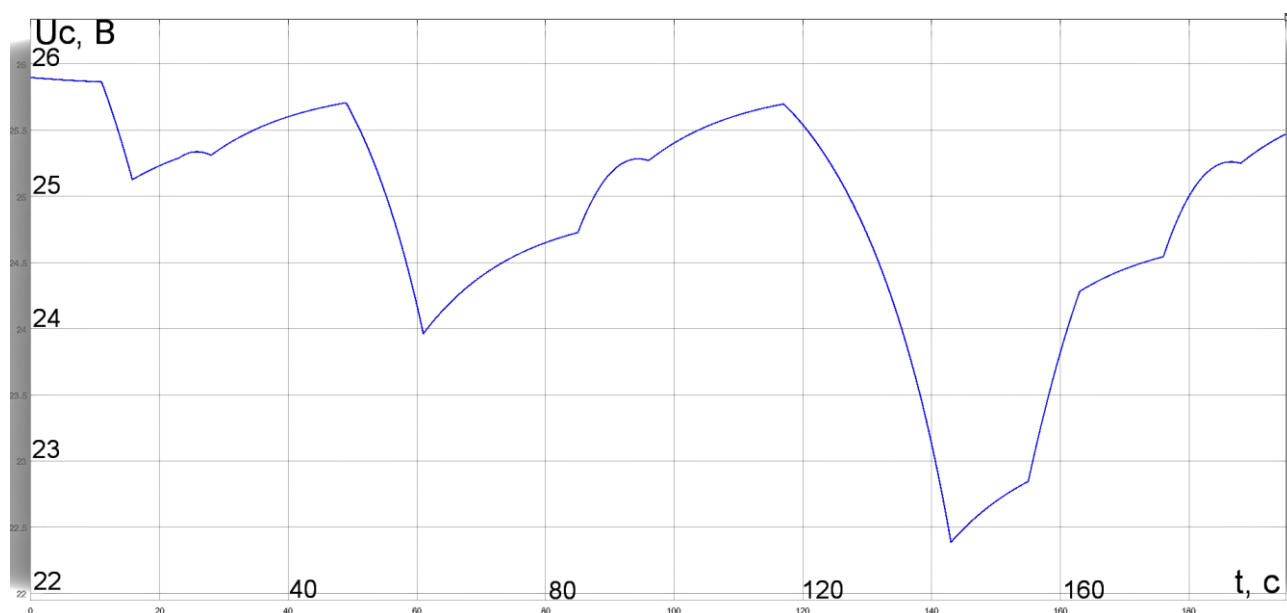


Рисунок 4.11 – Залежність напруги на суперконденсаторі від часу при ємності суперконденсатора 120 Ф з ППС та без системи дозаряду

Як видно, перед кожним новим розгоном напруга на суперконденсаторі вже помітно менша за початкове значення. Відмінність навіть сильніша, ніж у випадку джерела високої напруги. Це пов'язано з тим, що опір суперконденсаторів у більш раціональній конфігурації менший, а значить вони сильніше розряджались за час роботи. Використання ж системи дозаряду вирішує цю проблему. Залежність напруги на суперконденсаторі від часу при її використанні зображена на рис. 4.12.

За аналогічним методом, описаним в розділі 3, оцінюється енергоефективність електричного кола електроскутера. Використовуючи формули (3.16) та (3.15) визначається спожита енергія та ККД електричного кола. Спожита енергія склала 78373 Дж, ККД – 0,3911, а зменшення спожитої енергії порівняно із системою без суперконденсатора – 4,63%. Для порівняння, без системи дозаряду суперконденсатора ці значення склали 78440 Дж, 0,3908 та 4,54% відповідно.

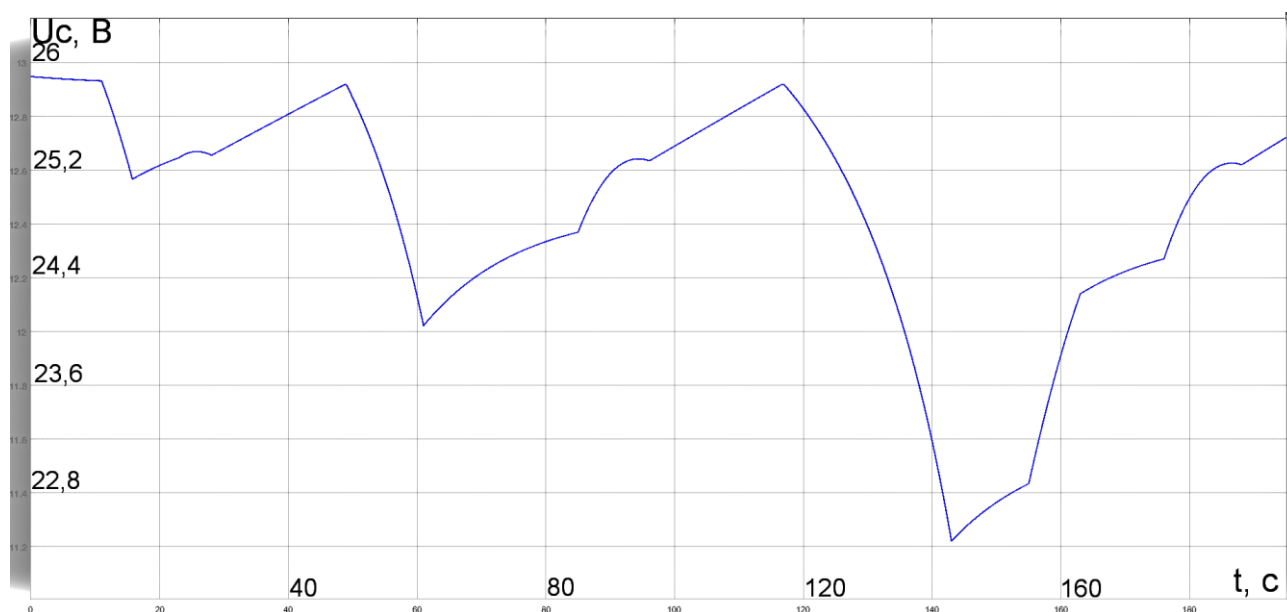


Рисунок 4.12 – Залежність напруги на суперконденсаторі від часу при ємності суперконденсатора 120 Ф з ППС та системою дозаряду

Провівши моделювання та розрахунки для інших значень ємностей отримано наступні результати, що знаходяться у табл. 4.2.

Таблиця 4.2 – Дослідження енергоефективності в залежності від ємності суперконденсаторної батареї при використанні перетворювача постійного струму за наявності системи дозаряду суперконденсатора та без неї.

с, Ф	W1, Дж		dW, %		W2, Дж	ККД	
	без д/з	з д/з	без д/з	з д/з		без д/з	з д/з
0	82174				30272	0,3684	
65	79142	79163	3,690	3,664	30505	0,3854	0,3853
120	78440	78373	4,544	4,626	30651	0,3908	0,3911
150	78039	77941	5,032	5,151	30681	0,3931	0,3936
200	77989	77877	5,093	5,229	30798	0,3949	0,3955
265	78650	78586	4,288	4,366	31091	0,3953	0,3956

Графік залежності спожитої енергії за міський їздовий цикл від ємності суперконденсатора при використанні системи дозаряду батареї суперконденсаторів та без неї для випадку використання перетворювача постійного струму наведений на рис. 4.13

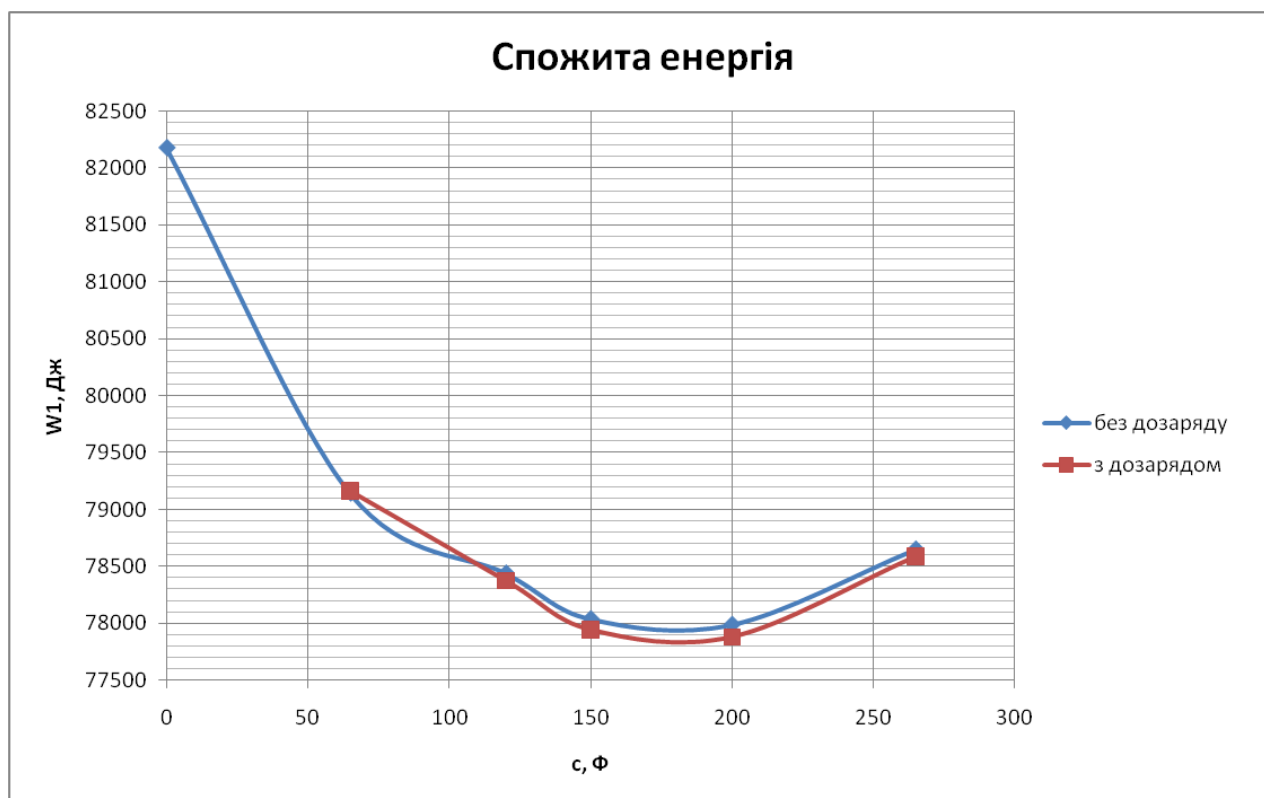


Рисунок 4.13 – Залежність спожитої за цикл енергії від ємності суперконденсатора при наявності системи дозаряду суперконденсатора та без неї при використанні ППС

Даний графік має дуже схожий вигляд з графіком для схеми без використання ППС (рис. 4.7). Аналогічно, при малих ємностях суперконденсатора ефект від системи дозаряду незначний, а при найнижчій ємності, яка досліджувалась – $C=65$ Ф – ефект навпаки негативний (спожито більше енергії, ніж без використання системи, у зв'язку з втратами на активному опорі L-фільтру). При занадто великих ємностях ефект також почав слабшати у зв'язку з тим, що для того, аби суперконденсатор встиг дозарядитись за період паузи, необхідно виставляти на ШІМ занадто великий струм, який збільшує втрати. Ну а найсильніший ефект випав якраз на точку оптимуму – $C=200$ Ф. При такій ємності економія енергії від використання системи дозаряду склала 0,136%.

Залежність зменшення спожитої енергії порівняно із випадком без суперконденсатора від ємності батареї для живлення пониженої напруги при використанні системи дозаряду та без неї зображена на рис. 4.14.

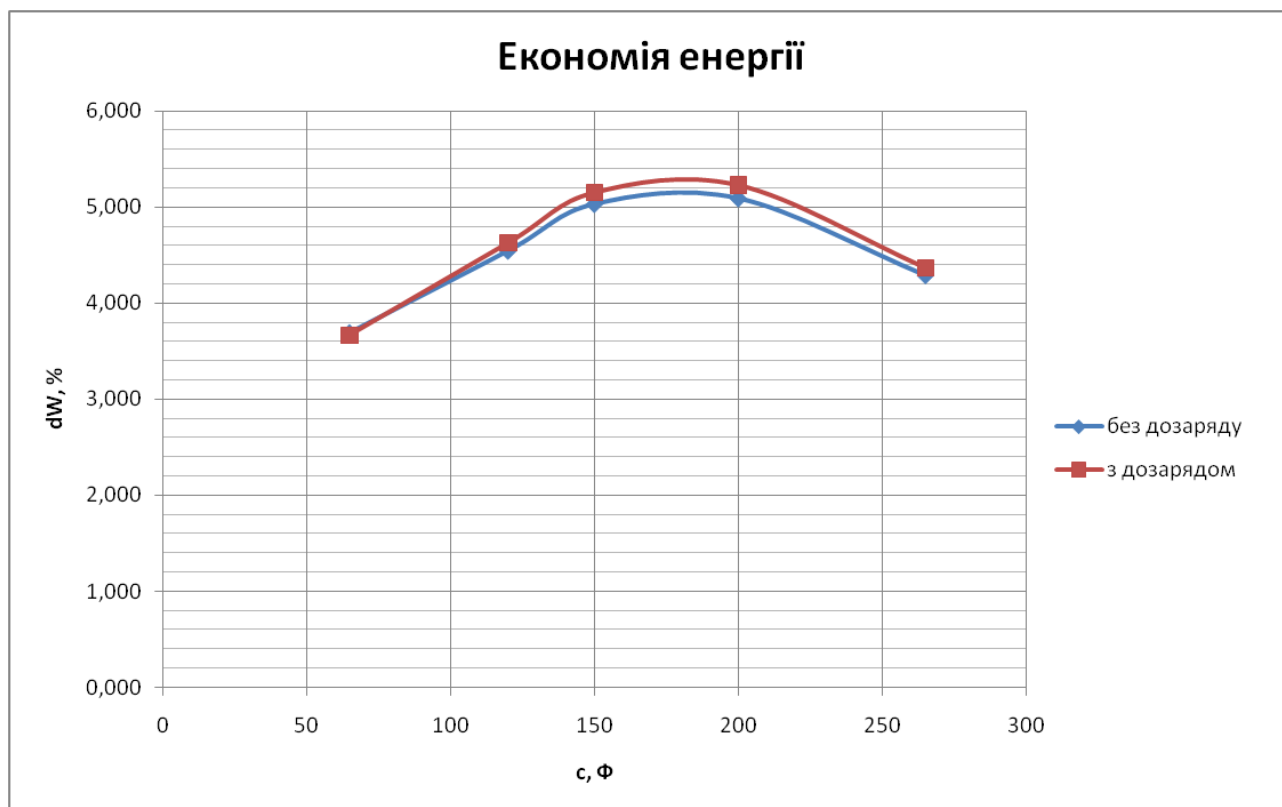


Рисунок 4.14 – Залежність зменшення споживання електроенергії від ємності суперконденсатора для джерела пониженої напруги при використанні системи дозаряду та без неї

Можна помітити, що для джерела високої напруги найбільш ефективна дія системи дозаряду суперконденсатора припала на точку з ємністю вищою за оптимальну, в той час як при пониженій напрузі співпала з оптимальною ємністю. Це можна пояснити тим, що завдяки більш ефективній конфігурації батареї суперконденсаторів для джерела пониженої напруги приведена ємність точки оптимуму стала більша. Залежність ефективності системи дозаряду суперконденсатора залишилась така сама, перетворювач постійного струму на неї майже не вплинув ніяким чином (рис. 4.15)

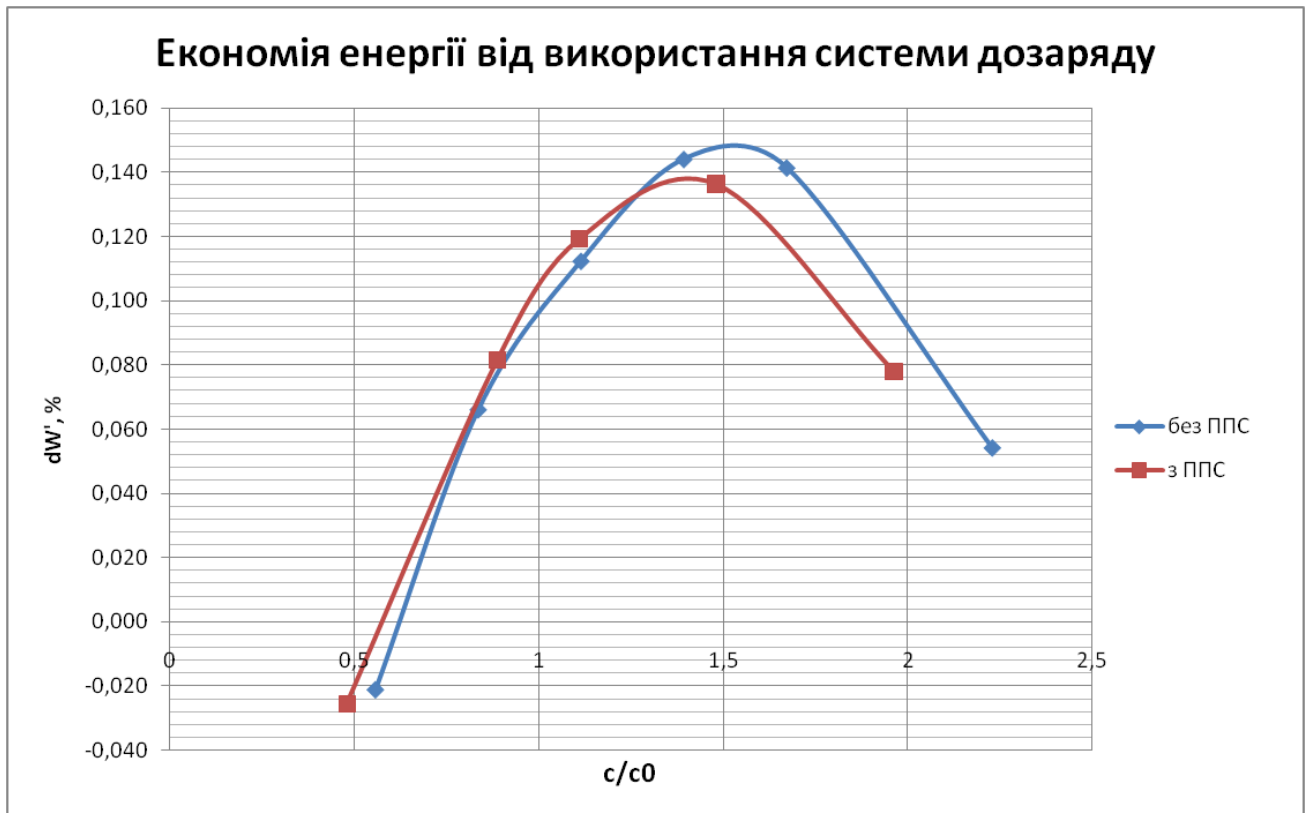


Рисунок 4.15 – Залежність зменшення споживання енергії при використанні системи дозаряду суперконденсатора від приведеної ємності суперконденсатора з використанням ППС та без нього

Тут dW' – різниця значень пониження споживання енергії (dW) для систем з використанням дозаряду мінус системи без дозаряду; c_0 – оцінково необхідне значення ємності суперконденсатора.

Найбільш ефективна дія системи дозаряду суперконденсатора спостерігається тоді, коли струм дозаряду близький до середнього струму за цикл. У такому разі дисперсія значення струму за цикл буде мінімальною, як і найменшими будуть сумарні втрати на активних опорах, що пропорційні середньому квадратичному струму (рис. 4.15). Це буде спостерігатись при ємності батареї суперконденсаторів $c=200$ Ф.

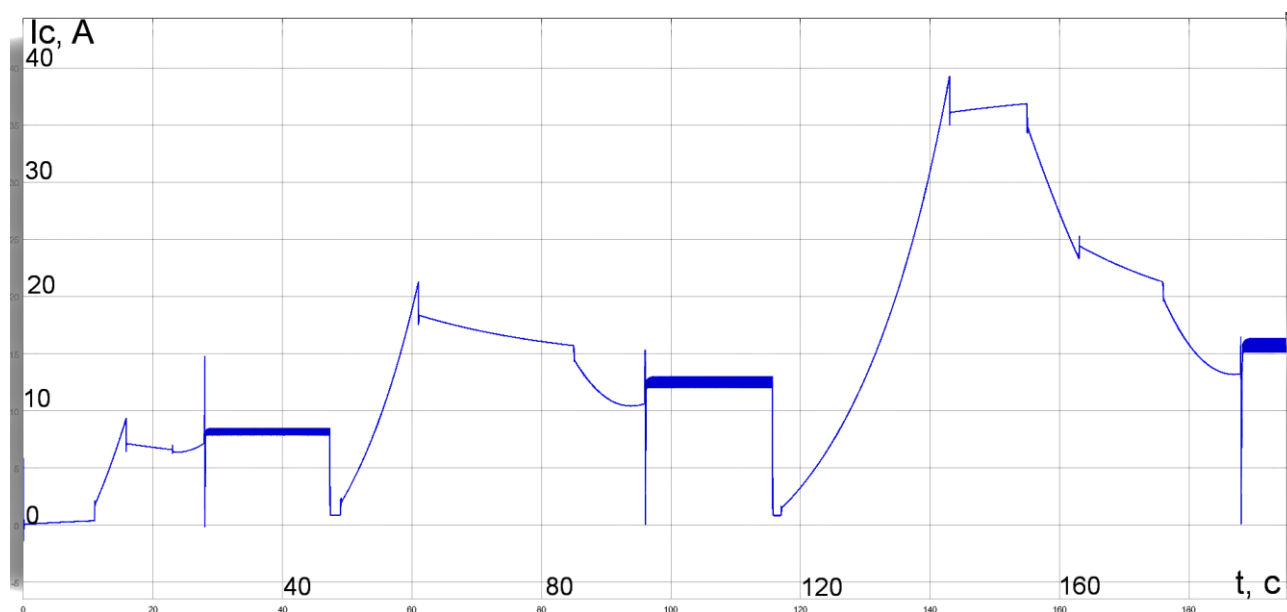


Рисунок 4.15 – Залежність струму акумулятора від часу при ємності суперконденсатора 200 Ф з ППС та системою дозаряду

Дослідження показали, що використання системи дозаряду суперконденсатора є вигідним і навіть необхідним для більшості випадків використання системи живлення акумулятор-суперконденсатор. Єдиний випадок, коли така система не є корисною – це коли суперконденсатор і без неї встигає дозарядитись до початкового значення під час пауз, тобто коли ємність суперконденсатора занадто низька або паузи занадто великі. Напруга джерела живлення та використання перетворювача постійного струму ніяким чином не впливають на роботу системи дозаряду суперконденсатора.

4.4 Висновок до розділу

1. Система розподілу живлення створює умови для дозаряду суперконденсатора до початкового значення напруги в моменти відсутності навантаження (зупинок електротранспорту). Без цієї системи суперконденсатор у періоди відсутності навантаження не встигає дозарядитись до початкового значення і наступний період навантаження починається із заниженим значенням його напруги, що призводить до додаткових втрат енергії. Основною перевагою запропонованої системи є використання існуючих елементів

електричного кола, тому її впровадження не вимагатиме додаткових матеріальних витрат.

2. Використання запропонованої системи дозволяє додатково зменшити споживання енергії в електричному колі на 0,14 % при відпрацюванні транспортним засобом європейського міського їздового циклу.

3. У випадку із використанням вторинного джерела живлення пониженої напруги можливе додаткове зменшення споживання енергії при відпрацюванні міського їздового циклу ще на 0,14 %.

Використання удосконаленої структури джерела живлення електричного кола дозаряду суперконденсатора під час пауз навантаження дозволяє без додаткових витрат чи суттєвих змін конфігурації електричного кола підвищити енергоефективність нелінійного електричного кола з автономним регульованим електромеханічним перетворювачем та зменшити споживання електроенергії.

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вирішено актуальне наукове завдання з підвищення ефективності перетворення енергії в нелінійних електричних колах зі змінним навантаженням шляхом удосконалення вибору його структури та методу розрахунку параметрів джерела живлення та накопичувача електроенергії на основі аналізу енергетичних процесів. Отримані науково-практичні результати мають важливе значення для розвитку теоретичної електротехніки в напрямку визначення ефективності перетворення енергії в електричних колах електротранспортних засобів із живленням від акумуляторних батарей.

Основні результати досліджень узагальнені наступним и висновками:

1. – Літій-іонні акумулятори, які найбільш широко застосовуються у якості джерел ЕРС таких електричних кіл, мають значний внутрішній електричний опір, що обумовлює зменшення ККД, зростання втрат в усьому електричному колі та пониження його енергоефективності;

– електричне коло містить також джерело ЕРС електродвигуна, величина якої змінюється в ході перехідних процесів обумовлених частими розгонами та сповільненнями транспортного засобу в умовах міського руху, причому це джерело працює як в режимі споживача так і генератора електроенергії, впливаючи на енергоефективність електричного кола;

– для покращення ефективності нелінійних електричних кіл використовуються різні схеми підключення до акумулятора суперконденсатора, як ефективного накопичувача енергії, що має високу швидкість заряду й розряду та велику питому потужність, проте питання визначення ємності суперконденсаторів та схем їх заряду й розряду в колі з автономним електромеханічним перетворювачем потребують додаткових досліджень;

– існуючі математичні моделі нелінійних електричних кіл зі змінним навантаженням не враховують повний перелік нелінійностей, не враховують особливість зміни ЕРС заступної схеми електродвигуна, містять недостатньо

точні математичні моделі акумуляторів в поєднанні з накопичувачами енергії на суперконденсаторах, що не дозволяє дати адекватний висновок про енергоефективність таких кіл;

– заступні схеми основних елементів електричного кола: акумулятора, суперконденсатора, силового електронного перетворювача, електродвигуна містять нелінійності, що значно ускладнює дослідження енергоефективності кола аналітичними методами в умовах великої розмірності розрахункової моделі, що обумовлює використання чисельних методів та моделювання для дослідження ефективності перетворення енергії в таких колах.

2. Розроблена математична модель нелінійного електричного кола зі змінним навантаженням для дослідження енергоефективності кола враховує нелінійності джерела на основі літій-іонного акумулятора та накопичувача енергії на основі суперконденсаторів, а також нелінійності електромеханічного перетворювача енергії. Модель також враховує різні схеми підключення суперконденсаторів до джерела живлення, динамічну зміну значення і напрямку ЕРС й магнітні втрати електродвигуна, дискретний характер формування його напруги живлення за допомогою силового електронного перетворювача.

3. Розроблена математична модель дає змогу дослідити ефективність перетворення енергії в нелінійному електричному колі зі змінним навантаженням в динамічних режимах в залежності від реальних умов роботи кола електротранспортних засобів, параметрів пасивних та активних елементів, в тому числі від ємності суперконденсаторів та схем їх підключення до джерела. Кількість спожитої електричним колом енергії залежить від значення ємності суперконденсатора, підключеного паралельно до акумулятора. Існує певне значення ємності, за якої споживання енергії при відпрацюванні заданого навантаження є мінімальним. Для досліджуваного кола електроскутера при відпрацюванні Європейського міського їздового циклу ця ємність становить 0,725 Ф за напруги живлення 370 В та 200 Ф за напруги живлення 24 В при використанні DC-DC перетворювача. Споживання енергії менше за аналогічне

коло без суперконденсатора на 2,9 кДж або 3,89 % для напруги живлення 370 В та на 4,19 кДж або 5,09 % для напруги живлення 24 В.

4. Удосконалення методу підвищення ефективності перетворення енергії в нелінійному електричному колі зі змінним навантаженням шляхом вибору раціональної структури та розрахунку параметрів джерела живлення і накопичувача енергії на суперконденсаторах дозволяє зменшити споживання колом електроенергії при відпрацюванні одного і того самого графіку навантаження. Використання покращеної системи розподілу живлення, суть якої полягає у прискореному дозаряді суперконденсатора під час пауз навантаження, дозволяє додатково зменшити споживання електричним колом енергії на 110 Дж або 0,14 % при відпрацюванні транспортним засобом міського їздового циклу. Перевагою запропонованого методу при його технічній реалізації є використання існуючих елементів електричного кола, тому впровадження не вимагатиме додаткових матеріальних витрат.

5. Використання наукових результатів дисертації дозволяє підвищити енергоефективність електричних транспортних засобів з нелінійними електричними колами зі змінним навантаженням на стадії проектування шляхом вибору раціонального значення ємності суперконденсатора, а також покращити енергоефективність існуючих засобів завдяки застосуванню удосконаленої системи розподілу живлення. Параметри удосконаленого електричного кола автономного джерела живлення можуть бути персоналізовано під кожного користувача – водія транспортного засобу – базуючись на тривалості пауз руху, мінімізуючи споживання енергії в конкретних умовах. Використання раціональної ємності суперконденсатора та удосконаленої системи керування джерелом живлення забезпечує зменшення максимальних ударних струмів через акумулятор, що підвищує надійність роботи електричного кола та збільшує тривалість експлуатації акумуляторної батареї.

6. Результати виконаних досліджень впроваджені в міжнародній компанії «DelFast» в роботі з мінімізації споживання енергії в нелінійних

електричних колах електробайків за рахунок використання методики підбору конфігурації джерела живлення, ДП НДІ «Квант» (м. Київ) в частині застосування методів числових розрахунків нелінійних електричних кіл з автономними регульованими електромеханічними перетворювачами енергії, навчальний процес кафедри теоретичної електротехніки КПІ ім. Ігоря Сікорського шляхом доповнення розділу «Нелінійні електричні кола» навчально-методичного комплексу дисципліни «Теоретичні основи електротехніки».

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Amran N.A., Sidek O., Jafar H.. Supercapacitor-battery slow charged rate for WSN application // International Conference on Advanced Computer Science and Information Systems. – 2012. – P. 490-495.
2. Ayad M. Y., Becherif M., Paire D., Djerdir A., Miraoui A. Passivity-Based Control of Hybrid Power Sources using Fuel Cell, Supercapacitors, and Batteries on the DC link for Energy Traction System // 2007 IEEE International Electric Machines & Drives Conference. – 2007. – Vol. 1. – P. 453-458.
3. Baccouche I., Mlayah A., Jemmali S., Manai B., Ben Amara N. E. Implementation of a Coulomb counting algorithm for SOC estimation of Li-Ion battery for multimedia applications // 12th International Multi-Conference on Systems, Signals & Devices. – 2015. – P. 1-6.
4. Becherif M., Ayad M. Y., Henni A., Aboubou A. Hybrid sources for train traction: Wind generator, solar panel and supercapacitors // 2010 IEEE International Energy Conference. – 2010. – P. 658-663.
5. Bhattacharjee R.. Switched reluctance motor applications to EV and HEV: Torque control issues // 1st International Conference on Non Conventional Energy. – 2014. – P. 324-328.
6. Bremer I., Ruecker F., Uwe Sauer D.. Investigation of li-ion battery state of health detection in electric vehicles – a comparison of simulation results and field measurement // IEEE Conference and Expo Transportation Electrification Asia-Pacific. – 2016. – P. 18-23.
7. Butterbach S., Vulturescu B., Coquery G., Forgez Ch., Friedrich G. Design of a supercapacitor-battery storage system for a waste collection vehicle // IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference. – 2010. – P. 1-6.
8. Byunghwan Kim, Jeongho Lee, Youngho Jeong, Byunghee Kang, Kinam Kim, Yeonho Kim, Youngju Park. Development of 50kW traction induction motor for electric vehicle (EV) // IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference. – 2012. – P. 142-147.

9. Caponio F., Abba A., Baruzzi P., Ripamonti G., Geraci A.. Modular and bi-directional energy storage system compliant with accumulators of different chemistry // 11th International Conference on Electrical Power Quality and Utilisation. – 2011. – P. 1-6.

10. Cong-Long Nguyen, Hong-Hee Lee. An optimal hybrid supercapacitor and battery energy storage system in wind power application // 41st Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society. – 2015. – P. 3010-3015.

11. Feizi T., Kwiecien M., Uwe Sauer D. Analysis of characteristics for the identification of lead-acid battery technologies used in micro-hybrid vehicles // 16th International Conference on Environment and Electrical Engineering. – 2016. – P. 1-5.

12. Ferreira T. J. P., Melo G. A., Canesin C. A., Brito M. A. G. Regenerative brake system for small scale electric bus // 11th IEEE/IAS International Conference on Industry Applications. – 2014. – P. 1-6.

13. Frivaldský M., Morgoš J., Hanko B. Start — Up power supply for automotive applications // 2018 ELEKTRO. – 2018. – P. 1-5.

14. Glavin M.E., Paul K.W. Chan, Armstrong S., Hurley W.G. A stand-alone photovoltaic supercapacitor battery hybrid energy storage system // 13th Power Electronics and Motion Control Conference. – 2008. – P. 1688-1695.

15. Goto H., Shibamoto T., Nakamura K., Ichinokura O. Development of high torque density axial-gap switched reluctance motor for in-wheel direct-drive EV // 15th European Conference on Power Electronics and Applications. – 2013. – P. 1-7.

16. Gudan K., Chemishkian S., Hull J. J., Thomas S. J., Ensworth J., Reynolds M. S. A 2.4GHz ambient RF energy harvesting system with -20dBm minimum input power and NiMH battery storage // IEEE RFID Technology and Applications Conference. – 2014. – P. 7-12.

17. Hao Q., Mascarella D., Joos G.. Flux-weakening loop design for EV drive with permanent magnet synchronous motor // IEEE Transportation Electrification Conference and Expo. – 2014. – P. 1-5.

18. Harzfeld E., Gallay R., Hahn M., Kötz R. Capacitance and series resistance determination in high power ultracapacitors // ESSCAP 04, Maxwell Proceeding, Belfort, France. — 2004. — P. 1–4.
19. He H., Xiong R., Fan J. Evaluation of lithium-ion battery equivalent circuit models for state of charge estimation by an experimental approach // *Energies*. — 2011. — T. 4. — №. 4. — P. 582-598.
20. Hemdana I., Dallagi H., Bouaicha H., Zaoui Ch., Nejim S. Hybrid electrical power supply for an electric propelled boat // 2018 International Conference on Advanced Systems and Electric Technologies (IC_ASET). — 2018. — P. 319-326.
21. Herrera D. B., Galvan E., Carrasco J. M. Synchronous reluctance motor design based EV powertrain with inverter integrated with redundant topology // 41st Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society. — 2015. — P. 3851-3856.
22. Herrera V. I., Gaztañaga H., Milo A., Nieva T., Etxeberria-Otadui I. Optimal Operation Mode Control and Sizing of a Battery-Supercapacitor Based Tramway // IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference. — 2015. — P. 1-6.
23. Herrera V. I., Gaztañaga H., Milo A., Saez-de-Ibarra A., Etxeberria-Otadui I., Nieva T. Optimal Energy Management and Sizing of a Battery-Supercapacitor-Based Light Rail Vehicle With a Multiobjective Approach // *IEEE Transactions on Industry Applications*. — 2016. — Vol. 52. — Iss. 4. — P. 3367-3377.
24. Hussein Kh., Ishihara M., Miyamoto N., Nakata Y. et al. New compact, high performance 7th Generation IGBT module with direct liquid cooling for EV/HEV inverters // 2015 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC). — 2015. — P. 1343-1346.
25. Jafari M., Platt G., Malekjamshidi Z., Jian Guo Zhu. Technical issues of sizing Lead-Acid batteries for application in residential renewable energy systems // 4th International Conference on Electric Power and Energy Conversion Systems. — 2015. — P. 1-6.
26. Jiayi Qiang, Guoqiang Ao, Jianhui He, Ziqiang Chen, Lin Yang. An adaptive algorithm of NiMH battery state of charge estimation for hybrid electric

vehicle // IEEE International Symposium on Industrial Electronics. – 2008. – P. 1556-1561.

27. Kabache N., Bouaissa M., Laidi A., Moulahoum S., Houassine H. FPGA implementation of a Lead-Acid Battery for photovoltaic applications // International Conference on Renewable Energy Research and Applications. – 2015. – P. 1219-1223.

28. Kenjo T., Takano Y. Comparison of torque-to-copper loss ratio in switched reluctance and induction motors for EV applications // 15th International Conference on Electrical Machines and Systems. – 2012. – P. 1-6.

29. Linden D., Reddy. T. B. Handbook of Batteries (3rd ed.). – New York: McGraw-Hill, 2002. – 235 p.

30. Lee J., Nam O., Cho B. H. Li-ion battery SOC estimation method based on the reduced order extended Kalman filtering // Journal of Power Sources. – 2007. – T. 174. – №. 1. – P. 9-15.

31. Maletin Y., Novak P., Shembel E. et al. Matching the nanoporous carbon electrodes and organic electrolytes in double layer capacitors // Applied Physics A. — 2005. — Vol. 82, No. 4. — P. 653–657.

32. Marchesoni M., Vacca C. A new DC-DC converter structure for power flow management in fuel-cell electric vehicles with energy storage systems // IEEE 35th Annual Power Electronics Specialists Conference. – 2004. – Vol.1. – P. 683-689.

33. Marchesoni M., Vacca C. New DC–DC Converter for Energy Storage System Interfacing in Fuel Cell Hybrid Electric Vehicles // IEEE Transactions on Power Electronics. – 2007. – Vol. 22. – Iss. 1. – P. 301-308.

34. Mason G. E., Daman M. E., Waller J. S., Hayden J. W. Lunar Prospector 5 Ah Super NiCd battery performance characteristics // The Thirteenth Annual Battery Conference on Applications and Advances. – 1998. – P. 103-106

35. Mendrela E. A., Drzewoski R. Performance of stator salient pole disc brushless DC motor for EV // Eighth International Conference on Power Electronics and Variable Speed Drives. – 2000. – P. 489-492.

36. Mihailescu B., Vasile A., Svasta P., Brodeala A. Start Soft Stop for controlling a reversible electric motor used in automotive // IEEE 17th International Symposium for Design and Technology in Electronic Packaging (SIITME). – 2011. – P. 121-124.

37. New European Driving Cycle – Wikipedia [Electronic source]. Режим доступа: https://en.wikipedia.org/wiki/New_European_Driving_Cycle

38. Nzisabira J., Louvigny Y., Duysinx P.. Comparison of ultra capacitors, hydraulic accumulators and batteries technologies to optimize hybrid vehicle ecoefficiency // 2009 International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives. – 2009. – P. 353-358.

39. Offer G. J., Plant D. J., Silversides R. W., Smith T. M. S. Control and energy management strategies for a novel series hybrid // 2013 World Electric Vehicle Symposium and Exhibition (EVS27). – 2013. – P. 1-10.

40. Ostroverkhov M., Reutskyi M., Trinchuk D. Study of the Induction Motor Electric Drive Efficiency in Transients during their Acceleration // Technology Audit and Production Reserves. – 2018. – № 5/1 (43). – P. 23-27.

41. Ostroverkhov M., Trinchuk D. Study into Energy Efficiency of the Drive of Electric Vehicles with an Independent Power Supply Depending on the Configuration of the Power Source // Technology Audit and Production Reserves. – 2018. – № 4/1 (42). – P. 45-50.

42. Ostroverkhov M., Trinchuk D. The Mathematical Model of a Nonlinear Electrical Circuit with an Independent Controllable Electromechanical Energy Converter // Technology Audit and Production Reserves. – 2019. – № 1/1 (45). – P. 39-43.

43. Pellegrino G., Vagati A., Boazzo B., Guglielmi P.. Comparison of Induction and PM Synchronous Motor Drives for EV Application Including Design Examples // IEEE Transactions on Industry Applications. – 2012. – Vol. 48. – Iss. 6. – P. 2322-2332.

44. Pistoia G. Batteries for Portable Devices. – Amsterdam, 2005. – 309 p.

45. Pistoia G. (ed.). Lithium-Ion Batteries: Advances and Applications. – Newnes, 2013. – 634 p.
46. Pitorac C. Using Li-Ion accumulators as traction batteries in the automotive industry. Cost reduction using ultra-capacitors // International Conference on Development and Application Systems. – 2016. – P. 212-218.
47. Rafik F., Gualous H., Gallay R. Et al. Frequency, thermal and voltage supercapacitor characterization and modeling // Journal of Power Sources. — 2007. — Vol. 165, No. 2. — P. 928–934.
48. Rahimi-Eichi H., Ojha U., Baronti F., Chow M. Battery Management System: An Overview of Its Application in the Smart Grid and Electric Vehicles // Industrial Electronics Magazine, IEEE — June 2013. — Vol.7. – No.2. — P.4-16.
49. Rahmoun A., Biechl H. Modelling of Li-ion batteries using equivalent circuit diagrams // Przegląd Elektrotechniczny. – 2012. – T. 88. – №. 7 B. – P. 152-156.
50. Reyes M. A., Novak T. Injury Surveillance and Safety Considerations for Large-Format Lead-Acid Batteries Used in Mining Applications // IEEE Transactions on Industry Applications. – 2016. – Vol. 52. – Iss. 2. – P. 1925-1930.
51. Renhart W., Magele C., Schweighofer B. FEM-Based Thermal Analysis of NiMH Batteries for Hybrid Vehicles // IEEE Transactions on Magnetics. – 2008. – Vol. 44. – Iss. 6. – P. 802-805.
52. Richter M., Zinser S., Stiegeler M., Mendes M., Kabza H.. Energy management for range enlargement of a hybrid battery vehicle with battery and double layer capacitors // Proceedings of the 2011 14th European Conference on Power Electronics and Applications. – 2011. – P. 1-6.
53. Sanfeng Liu, Jun Peng, Liran Li, Xiaohui Gong, Honghai Lu. A MPC based energy management strategy for battery-supercapacitor combined energy storage system of HEV // 35th Chinese Control Conference. – 2016. – P. 8727-8731.
54. Satou T., Morimoto Sh., Sanada M., Inoue Y. A study on the rotor design of the synchronous reluctance motor for EV and HEV propulsion // 10th International Conference on Power Electronics and Drive Systems. – 2013. – P. 1190-1194.

55. Shepherd C.M. Design of Primary and Secondary Cells // J. Electrochem. Soc. – 1965. – Vol. 112. – Iss. 7 –P. 657-664.

56. Sikkabut S., Mungporn P., Ekkaravarodome C., Bizon N., Tricoli P., Nahid-Mobarakeh B.. Control of High-Energy High-Power Densities Storage Devices by Li-ion Battery and Supercapacitor for Fuel Cell/Photovoltaic Hybrid Power Plant for Autonomous System Applications // IEEE Transactions on Industry Applications. – 2016. – Vol.52. – Iss. 5. – P. 4395-4407.

57. Sim S. Y., Utomo W. M., Haron Z. A., Bohari A. A., Zin N. M., Ariff R. M. Neural network SVPWM-DTC of induction motor for EV load model // Electrical Power, Electronics, Communications, Controls and Informatics Seminar. – 2014. – P. 23-28.

58. Singh A., Karandikar P.B. Lead-acid battery for HEV using fuzzy controller and ultracapacitor // Biennial International Conference on Power and Energy Systems: Towards Sustainable Energy (PESTSE). – 2016. – P. 1-5.

59. Strauch M., Dewenter S., Binder A., Nam K. H. Calculation of the electromagnetic characteristics of an electrically excited synchronous motor for an EV // IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference. – 2012. – P. 1086-1091.

60. Tang X. et al. Li-ion battery parameter estimation for state of charge // American Control Conference (ACC). – 2011. – P. 941-946.

61. Taylor J. N. Vantage, the ultra low maintenance NiCd battery for communication applications // 17th International Telecommunications Energy Conference. – 1995. – P. 778-782.

62. Thounthong P., Sikkabut S., Mungporn P., Ekkaravarodome C., Bizon N., Tricoli P., Nahid-Mobarakeh B.. Performance investigation of high-energy high-power densities storage devices by li-ion battery and supercapacitor for fuel cell/photovoltaic hybrid power plant for autonomous system applications // IEEE Industry Applications Society Annual Meeting. – 2015. – P. 1-10.

63. Trinchuk D. Analysis of the Efficiency of Energy Transformation in Induction Motor Electric Drives with Independent Power Supply // IEEE

International young scientists forum on applied physics and engineering. – Lviv, 2017.– P. 24-27.

64. Villet W. T., Kamper M. J. Variable-Gear EV Reluctance Synchronous Motor Drives—An Evaluation of Rotor Structures for Position-Sensorless Control // IEEE Transactions on Industrial Electronics. – 2014. – Vol. 61. – Iss. 10. – P. 5732-5740.

65. Wang C., Appleby A. J., Little F. E. Electrochemical impedance study of initial lithium ion intercalation into graphite powders //Electrochimica acta. – 2001. – T. 46. – №. 12. – P. 1793-1813.

66. Wei Wang, Daiwon Choi, Zhenguo Yang. Li-Ion Battery with LiFePO₄ Cathode and Li₄Ti₅O₁₂ Anode for Stationary Energy Storage // Metallurgical and Materials Transactions A. – 2013. – Vol. 44. – P. 21-25.

67. Xing Zhang, Shengyong Liu, Hongbin Chen, Xie Jun, Haibin Guo. Multiple-port DC/DC converter for power flows management in electric vehicles // The 2nd International Symposium on Power Electronics for Distributed Generation Systems. – 2010. – P. 727-730.

68. Yue Zhang, Wenping Cao, Sean McLoone, John Morrow. Design and Flux-Weakening Control of an Interior Permanent Magnet Synchronous Motor for Electric Vehicles // IEEE Transactions on Applied Superconductivity. – 2016. – Vol. 26. – Iss. 7. – Article №: 0606906.

69. Zhi Yang, Fei Shang, Ian P. Brown, Mahesh Krishnamurthy. Comparative Study of Interior Permanent Magnet, Induction, and Switched Reluctance Motor Drives for EV and HEV Applications // IEEE Transactions on Transportation Electrification. – 2015. – Vol. 1. – Iss. 3. – P. 245-254.

70. Zubieta L., Bonert R. Characterization of double-layer capacitors for power electronics applications // IEEE Transactions on Industry Applications. — 2000. — Vol. 36, No. 1. — P. 199–205

71. Алабышев А. Ф., Вячеславов П. М., Гальнбек А. А., Животинский П. Б., Ротинян А. Л., Федотьев Н. П. Прикладная электрохимия. – Львов: Химия, 1962. – 536 с.

72. Безносенко Д.М. Структура и алгоритмы управления электротрансмиссией большегрузных автосамосвалов: дисс. ... канд. тех. наук: спец. 05.09.03. – Санкт-Петербург, 2008. – 181с.

73. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники. – Москва: Высшая школа, 1973. – 733 с.

74. Білецький О.О. Енергетичні процеси в колах заряду суперконденсаторів зі змінними початковими напругами: дис. ... канд. тех. наук: спец. 05.09.05. – Київ, 2016. – 195 с.

75. Борисевич А.В. Моделирование литий-ионных аккумуляторов для систем управления батареями: обзор текущего состояния // Современная техника и технологии. – 2014. – №5.[Электронный ресурс] Режим доступа: <http://technology.snauka.ru/2014/05/3542>

76. Бурик М. П. Електроприводи підпорядкованої структури з властивостями слабкої чутливості до параметричних та координатних збурень: дис. ... канд. тех. наук: спец. 05.09.03. – Київ, 2014. – 244 с

77. В Нідерландах побудували сховище ємністю 20 МВт-год для зберігання надлишку «сонячної» електроенергії [Електронний ресурс]. Режим доступу: <http://ecotown.com.ua/news/V-Niderlandakh-pobuduvaly-skhovyshche-yemnistyu-20-MVt-hod-dlya-zberihannya-nadlyshku-sonyachnoyi-el/> (переглянуто 6.02.2019).

78. Вольдек А.И. Электрические машины. – Л.:Энергия, 1974. – 840с.

79. Громадський Д. Г., Ізотов В. Ю., Малетін Ю. А. Моделирование и расчет рабочих параметров суперконденсатора // Наук. вісті НТУУ “КПІ.” — 2008. — No. 6. — С. 114–118.

80. Демирчян К.С., Нейман Л.Р., Коровкин Н.В., Чечурин В.Л. Теоретические основы электротехники. Т. 3. СПб.: Питер, 2003. – 377 с.

81. Дьяконов В.П. Simulink 5/6/7: Самоучитель. – Москва: ДМК Пресс, 2012. – 784 с.

82. Жерве Г.К., Промышленные испытания электрических машин. – 4-е изд., сокр. и перераб. – Л.:Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1984. – 408 с.

83. Изосимов Д. Б., Гнездов Н. Е., Журавлев С. В. Проектирование асинхронных тяговых двигателей и синтез векторного управления тяговыми приводами // Электронные компоненты. – 2010. – №11. – С. 17-22.

84. Ильин В.П. Численные методы решения задач электрофизики. – Москва: Наука, 1985. – 334с.

85. Ізотов В. Ю., Громадський Д. Г., Рудницька Г. А. Дослідження роботи суперконденсатора в рамках дволанкової гс-моделі // Технічна електродинаміка. — 2011. — №. 2. — С. 70–75.

86. Инвертор — Вікіпедія [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%86%D0%BD%D0%B2%D0%B5%D1%80%D1%82%D0%BE%D1%80>

87. Іоністор — Вікіпедія [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%86%D0%BE%D0%BD%D1%96%D1%81%D1%82%D0%BE%D1%80>

88. Каталог «Электроника и автоматика» – Elfa Distrelec, 2014. – 2604 с

89. Копылов И.П. Проектирование электрических машин: Учебное пособие для вузов. М.: «Энергия», 1980. – 496с.

90. Коровин Н. В., Скундин А. М. Химические источники тока: Справочник.– Москва: МЭИ, 2003. –С. 740.

91. Костенко М. П., Пиотровский Л. М. Электрические машины. – Москва; Львов, 1958. — Ч.2. – 648 с.

92. Кравчик А.Э. Асинхронные двигатели серии 4А. Справочник – Москва: Энергоиздат., 1982. – 502с.

93. Лашкевич М.М. Разработка системы управления для электротрансмиссии с тяговыми вентильно-индукторными двигателями: дисс. ... канд. тех. наук: спец. 05.09.03. – Москва, 2013. – 154 с.

94. Мироновский Л. А., Петрова К. Ю.. Введение В Matlab. Учебное пособие. – Санкт-Петербург, 2005. – 122 с.

95. Москатов Е. А. Источники питания. – Киев: МК-Пресс, Санкт-Петербург: КОРОНА-ВЕК, 2011.—208 с.

96. Островерхов М.Я., Реуцький М.О., Трінчук Д.Я. Використання Комп'ютерного моделювання для дослідження робочих режимів нелінійного електричного кола з автономним джерелом живлення на прикладі електроскутера // Шоста міжнародна науково-технічна конференція. Моделювання в електротехніці і світлотехніці. – Київ, 2016.

97. Островерхов М.Я., Реуцький М.О., Трінчук Д.Я. Дослідження енергоефективності нелінійного електричного кола з автономним живленням на прикладі привода скутера // Вісник національного технічного університету «ХПІ». Серія «Механіко-технологічні системи та комплекси». – Харків: НТУ «ХПІ», 2016. – Вип. 4(1176). – С. 109-115.

98. Островерхов М. Я., Реуцький М.О., Трінчук Д.Я. Дослідження ефективності перетворення енергії в приводі електроскутера в залежності від системи живлення та навантаження // Енергетика: економіка, технології, екологія. – 2017. – №3. – С. 51-55

99. Островерхов М. Я., Реуцький М. О., Трінчук Д. Я. Дослідження робочих режимів нелінійного електричного кола з автономним джерелом живлення в транспортних установках на прикладі привода електроскутера // Проблеми енергоресурсозбереження в електротехнічних системах. – Кременчук: КрНУ, 2016. – Вип. 1/2016 (4). – С. 75–77.

100. Островерхов М.Я., Реуцький М.О., Трінчук Д.Я. Ефективність перетворення енергії в нелінійному електричному колі електроскутера, що працює на міський їздовий цикл // Вісник національного технічного університету «ХПІ». – Харків: НТУ «ХПІ», 2017. – Вип. 27(1249). – С. 249-253.

101. Островерхов М.Я., Трінчук Д.Я. Дослідження енергоефективності приводу електричних транспортних засобів з автономним живленням із суперконденсатором з використанням перетворювача постійного струму // Електротехнічні та комп'ютерні системи. – Одеса, 2018. – Вип. 29(105). – С. 58-65.

102. Панкратов В.В. Векторное управление асинхронным электроприводами. – Новосибирск, 1999. – 66 с.

103. Получи от электромобиля максимум – Stroom [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://stroom.ua/eco-vozhdenie/>

104. Поршнеv С.В. MATLAB 7. Основы работы и программирования. Учебник. – "Бином. Лаборатория знаний", 2006. – 320 с.

105. Постников И. М. Проектирование электрических машин. – Киев, 1952. – 910 с.

106. Радин В.И., Брусникин Д.Э., Зохорович А.Е., Электрические машины: Асинхронные машины: Учеб. для электромех. спец. вузов. – М.:Высш. шк., 1988. – 328 с

107. Реуцький М. О., Трінчук Д. Я., Дешко А. О. Застосування суперконденсаторів у приводі електромобиля на базі двигуна постійного струму з незалежним збудженням // Міжнародна науково-технічна конференція молодих учених, аспірантів, студентів. Сучасні проблеми електроенерготехніки та автоматики – Київ, 2014.

108. Реуцький М.О., Шинкаренко В.Ф., Дешко А.О. Трінчук Д.Я. Електромеханічний комплекс для дослідження машин постійного струму // Міжнародна науково-технічна конференція молодих учених, аспірантів, студентів. Сучасні проблеми електроенерготехніки та автоматики – Київ, 2014.74. Романов В. В., Хашев Ю. М.. Химические источники тока//М. Сов. радио, 2-е изд., 1978. – 315 с.

109. Романов В. В., Хашев Ю. М.. Химические источники тока//М. Сов. радио, 2-е изд., 1978. – 315 с.

110. Соколовский Г. Г. Электроприводы переменного тока с частотным регулированием. – Москва: Академия, 2006.–272 с.

111. Статті о векторном управлении [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://xn----8sbecmada0aoptggbsmf4a0a.xn--p1ai/stati-o-vektornom-upravlenii.html>

112. Ткачук В.І., Біляковський І.Є. Вентильний двигун для приводу коліс трамваю з низькою посадкою // Вісник Національного університету "Львівська політехніка". – 2010 – № 671. – С. 102-108.

113. Ткачук В.І., Біляковський І.Є., Жук В.І. Вентильний двигун для електроприводу коліс тролейбуса // Вісник Національного університету "Львівська політехніка". – 2014. – № 785. – С. 77-82.

114. Трінчук Д.Я. Дослідження експлуатаційних режимів машин постійного струму транспортних установок: магістерська дис.: спец. 05.07.02. – Київ, 2015. – 88 с.

115. Фираго Б.И. Регулируемые электроприводы переменного тока // Мн.: Техноперспектива, 2006. – С. 363.

116. Хаскина С. М., Даниленко И. Ф.. Сб. работ по ХИТ –Энергия, Л., 1981. – 34с.

117. Черных И. В. Simulink: Инструмент моделирования динамических систем [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://matlab.exponenta.ru/simulink/book1/>

118. Чуев П. В. Разработка систем векторного управления асинхронными приводами на базе специализированных сигнальных микроконтроллеров: дисс. ... канд. тех. наук: спец. 05.09.03. – Москва, 2002. – 254 с.

119. Шайхиев А. Р. Улучшение тяговых свойств электроподвижного состава с вентильно-индукторным тяговым электроприводом путём снижения пульсаций электромагнитного момента: дисс. ... канд. тех. наук: 05.22.07, 05.09.03. – Ростов-на-Дону, 2004. – 135 с.

120. Шембель О. М., Білогуров В. А. Основні характеристики сучасних хімічних джерел струму різних електрохімічних систем // Сучасна спеціальна техніка. Науково-практичний журнал. – 2009. – № 2(17). – С. 66-86.

121. Шидловский А.К., Павлов В.Б., Попов А.В. Применение суперконденсаторов в автономном аккумуляторном электротранспорте // Технічна електродинаміка. –Київ, 2008. – №4. – С. 43-47.

ДОДАТОК А.

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ ТА ВІДОМОСТІ ПРО
АПРОБАЦІЮ РЕЗУЛЬТАТІВ ДИСЕРТАЦІЇ

За результатами дисертаційної роботи опубліковано 7 наукових статей у фахових виданнях, 3 з яких входять до міжнародних наукометричних баз даних, та 5 робіт у матеріалах наукових конференцій, 1 з яких відноситься до міжнародної наукометричної бази даних SCOPUS.

SCOPUS:

1. **Trinchuk D.** Analysis of the Efficiency of Energy Transformation in Induction Motor Electric Drives with Independent Power Supply. // IEEE International young scientists forum on applied physics and engineering. – Lviv, 2017. – P. 24-27.

Фахові видання:

2. Островерхов М. Я., Реуцький М. О., **Трінчук Д. Я.** Дослідження енергоефективності нелінійного електричного кола з автономним живленням на прикладі привода скутера // Вісник національного технічного університету «ХПІ». Серія «Механіко-технологічні системи та комплекси». – Харків: НТУ «ХПІ», 2016. – Вип. 4(1176). – С. 109-115.

3. Островерхов М. Я., Реуцький М. О., **Трінчук Д. Я.** Ефективність перетворення енергії в нелінійному електричному колі електроскутера, що працює на міський їздовий цикл // Вісник національного технічного університету «ХПІ». – Харків: НТУ «ХПІ», 2017. – Вип. 27(1249). – С. 249-253.

4. Островерхов М. Я., Реуцький М. О., **Трінчук Д. Я.** Дослідження ефективності перетворення енергії в приводі електроскутера в залежності від системи живлення та навантаження // Енергетика: економіка, технології, екологія. – 2017. - №3. – С. 51-55.

5. Ostroverkhov M., **Trinchuk D.** Study into Energy Efficiency of the Drive of Electric Vehicles with an Independent Power Supply Depending on the

Configuration of the Power Source // Technology Audit and Production Reserves. – 2018. – № 4/1 (42). – P. 45-50. (**Index Copernicus**)

6. Ostroverkhov M., Reutskyi M., **Trinchuk D.** Study of the Induction Motor Electric Drive Efficiency in Transients during their Acceleration // Technology Audit and Production Reserves. – 2018. – № 5/1 (43). – P. 23-27. (**Index Copernicus**)

7. Островерхов М. Я., **Трінчук Д. Я.** Дослідження енергоефективності приводу електричних транспортних засобів з автономним живленням із суперконденсатором з використанням перетворювача постійного струму // Електротехнічні та комп'ютерні системи. – Одеса, 2018. – Вип. 29(105). – с. 58-65.

8. Ostroverkhov M., **Trinchuk D.** The Mathematical Model of a Nonlinear Electrical Circuit with an Independent Controllable Electromechanical Energy Converter // Technology Audit and Production Reserves. – 2019. – № 1/1 (45). – P. 39-43. (**Index Copernicus**)

Тези доповідей на наукових конференціях:

9. Островерхов М.Я., Реуцький М.О., **Трінчук Д.Я.** Дослідження робочих режимів нелінійного електричного кола з автономним джерелом живлення в транспортних установках на прикладі приводу електроскутера // Проблеми енергоресурсозбереження в електротехнічних системах. – Кременчук: КрНУ, 2016. – Вип. 1/2016 (4). – С. 75–77.

10. Реуцький М.О., **Трінчук Д.Я.**, Дешко А.О. Застосування суперконденсаторів у приводі електромобіля на базі двигуна постійного струму з незалежним збудженням // Міжнародна науково-технічна конференція молодих учених, аспірантів, студентів. Сучасні проблеми електроенерготехніки та автоматики – Київ, 2014.

11. Реуцький М.О., Шинкаренко В.Ф., Дешко А.О. **Трінчук Д.Я.** Електромеханічний комплекс для дослідження машин постійного струму // Міжнародна науково-технічна конференція молодих учених, аспірантів, студентів. Сучасні проблеми електроенерготехніки та автоматики – Київ, 2014.

12. Островерхов М.Я., Реуцький М.О., **Трінчук Д.Я.** Використання Комп'ютерного моделювання для дослідження робочих режимів нелінійного електричного кола з автономним джерелом живлення на прикладі електроскутера // Шоста міжнародна науково-технічна конференція. Моделювання в електротехніці і світлотехніці. – Київ, 2016.

ДОДАТОК Б

ПЕРЕВІРОЧНИЙ РОЗРАХУНОК АСИНХРОННОГО ДВИГУНА ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ЙОГО ЗАСТУПНОЇ СХЕМИ

Основними розмірами асинхронного двигуна (АД) є [92]:

- діаметр розточки (внутрішній) D ;
- розрахункова довжина (середня довжина пакетів магнітопроводів статора і ротора) L_δ .

Розрахунок основних розмірів проводиться трьома способами:

- за сталою Арнольда [78];
- за універсальною електромашинною сталою [78];
- за рекомендаціями [106], що враховують вимоги сучасних стандартів і можливість уніфікації основних і конструктивних розмірів.

В процесі розрахунку використовуються вирази і рекомендації щодо вибору окремих величин з [78] і [82].

За базовий двигун для розрахунку був взятий двигун марки M2AA 080 C2 виробництва компанії ABB.

1 Вхідні дані асинхронного двигуна прототипу для проведення перевірного розрахунку:

- зовнішній діаметр статора $D_a = 0,1246 \text{ м}$;
- внутрішній діаметр статора $D = 0,065 \text{ м}$;
- довжина повітряного проміжку $l_\delta = 0,08 \text{ м}$;
- висота осі обертання $h = 0,08 \text{ м}$;
- кількість пазів статора $Z_1 = 24$;
- кількість пазів ротора $Z_2 = 24$;
- повітряний проміжок $\delta = 0,3 \text{ мм}$.

1.1 Вибір основних розмірів за допомогою сталої Арнольда

1.1.1 Розрахункова потужність:

$$S_{em} = P_2 \cdot \frac{k_e}{\eta \cdot \cos \varphi} = 1100 \cdot \frac{0,975}{0,806 \cdot 0,8} = 1663,31 B \cdot A,$$

де $\eta=0,806$ – коефіцієнт корисної дії;

$\cos \varphi=0,8$ – коефіцієнт потужності при номінальному навантаженні – прийняті енергетичні коефіцієнти з паспортних даних електродвигуна;

$$k_e = \frac{E}{U} = 0,975 - \text{коефіцієнт (рисунок 6-8 [89])}.$$

1.1.2 Стала Арнольда:

$$C_A = \frac{\sqrt{2}}{\pi^2 \cdot A \cdot B_\delta \cdot k_{об}} = \frac{\sqrt{2}}{3,14^2 \cdot 20000 \cdot 0,72 \cdot 0,96} = 1,036 \cdot 10^{-5},$$

де $A=20000 \text{ A/м}^2$ – лінійне навантаження (рисунок 6-11 [89]);

$B=0,72 \text{ Тл}$ – індукція в повітряному проміжку (рисунок 6-11 [89]);

$K_{обл}=0,96$ – заздалегідь заданий обмотувальний коефіцієнт (рисунок 6-8 [89]).

1.1.3 Зовнішній діаметр статора:

$$D_a = \sqrt[3]{\frac{C_A \cdot S \cdot 2 \cdot p}{\frac{n}{60} \cdot \pi \cdot \lambda}} = \sqrt[3]{\frac{1,036 \cdot 10^{-5} \cdot 1663,31 \cdot 2 \cdot 1}{\frac{3000}{60} \cdot 3,14 \cdot 0,41}} = 0,10315 \text{ м},$$

де $n_l=3000 \text{ об/хв}$ – синхронна частота обертання;

$\lambda=0,41$ – геометричне співвідношення (рисунок 6-14 [89]).

В подальших розрахунках використовується зовнішній діаметр статора знятий з розмірів машини АВВ і рівний $D_a=0,1246 \text{ м}$.

1.1.4 Довжина активної частини:

$$l_\delta = \frac{\lambda \cdot \pi \cdot D_a}{2p} = \frac{0,41 \cdot 3,14 \cdot 0,1246}{2 \cdot 1} = 0,08 \text{ м}$$

1.2 Вибір основних розмірів за методикою [89].

1.2.1 Число пар полюсів:

$$p=1.$$

1.2.2 Висота осі обертання:

$$h=0,08\text{ м}$$

1.2.3 Внутрішній діаметр розточування статора:

$$D = k_d \cdot D_a = 0,52 \cdot 0,1246 = 0,065\text{ м},$$

де $D_a=0,1246\text{ м}$ – зовнішній діаметр магнітопроводу статора (таблиця 6-6[89]);

$$k_d = \frac{D}{D_a} = \frac{0,065}{0,1246} = 0,52 \text{ - співвідношення діаметрів статора (таблиця 6-7 [89]).}$$

1.2.4 Полісна поділка:

$$\tau = \frac{\pi \cdot D}{2p} = \frac{3,14 \cdot 0,065}{2 \cdot 1} = 0,1021\text{ м}$$

1.2.5 Розрахункова довжина повітряного проміжку:

$$l_\delta = \frac{S}{1,11 \cdot D^2 \cdot \omega \cdot k_{\text{од}} \cdot A \cdot B_\delta} = \frac{1663,31}{1,11 \cdot 0,065^2 \cdot 314,16 \cdot 0,96 \cdot 20000 \cdot 0,72} = 0,08\text{ м},$$

$$\text{де } \omega = \frac{2 \cdot \pi \cdot n_1}{60} = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 3000}{60} = 314,16 \text{ рад/с.}$$

1.2.6 Відношення:

$$\lambda = \frac{l_\delta}{\tau} = \frac{0,08}{0,1021} = 1,276$$

1.3 Аналіз отриманих результатів:

- $l_\delta=0,08\text{ м}$ – розрахункова довжина магнітопроводу статора;
- $D=0,065\text{ м}$ – діаметр розточки статора;
- $\lambda=1,276$.

2 Визначення Z_1 , W_1 , і перерізу дроту обмотки

2.1 Можливе число пазів статора :

- максимальне:

$$Z_{1\max} = \frac{\pi \cdot D}{t_{1\min}} = \frac{3,14 \cdot 0,065}{0,008} = 25,525 ;$$

- мінімальне:

$$Z_{1\min} = \frac{\pi \cdot D}{t_{1\max}} = \frac{3,14 \cdot 0,065}{0,01} = 20,42 ,$$

де зубцева поділка статора $t_{1\max}=0,01$ і $t_{1\min}=0,008$ відповідно найбільший і найменший розмір зубцевої поділки статора (рисунок 6-16 [89]).

2.2 Для подальших розрахунків прийнято $Z_1=24$.

2.3 Число пазів на полюс і фазу:

$$q = \frac{Z_1}{2p \cdot m} = \frac{24}{2 \cdot 1 \cdot 3} = 4$$

2.4 Зубцева поділка статора:

$$t_1 = \frac{\pi \cdot D}{2 \cdot p \cdot 3 \cdot q} = \frac{3,14 \cdot 0,065}{2 \cdot 1 \cdot 3 \cdot 4} = 8,508 \cdot 10^{-3} \text{ м}$$

2.5 Струм статора:

$$I_{1н} = \frac{P_n}{m \cdot U_\phi \cdot \cos \varphi \cdot \eta} = \frac{1100}{3 \cdot 230 \cdot 0,8 \cdot 0,806} = 2,47 \text{ А},$$

де $U_\phi=230$ В – номінальна напруга.

2.6 Вибрана одношарова обмотка статора, яку має серійний двигун.

2.7 Крок обмотки по пазах:

$$y = \frac{Z_1}{2p} = \frac{24}{2 \cdot 1} = 12.$$

2.8 Уточнення обмотувального коефіцієнта:

$$k_{об} = k_p \cdot k_{ск} \cdot k_y = 1 \cdot 0,96 \cdot 1 = 0,96 ,$$

де $k_{ск}=1$ – коефіцієнт скосу;

$$k_p = \frac{\sin\left(\frac{\pi}{2 \cdot m}\right)}{q \cdot \sin\left(\frac{\pi}{2 \cdot m \cdot q}\right)} = \frac{\sin\left(\frac{3,14}{2 \cdot 3}\right)}{3 \cdot \sin\left(\frac{3,14}{2 \cdot 3 \cdot 4}\right)} = 0,958 - \text{коефіцієнт розподілу};$$

$$k_y = \sin\left(\frac{\pi \cdot y}{2 \cdot \frac{\tau}{t_1}}\right) = \sin\left(\frac{3,14 \cdot 12}{2 \cdot \frac{0,1021}{8,508 \cdot 10^{-3}}}\right) = 1 - \text{коефіцієнт укорочення}.$$

2.9 Число ефективних провідників в пазу (попередньо, для $a=1$)

$$U_{\phi} = \frac{\pi \cdot D \cdot A}{I_1 \cdot Z_1} = \frac{3,14 \cdot 0,065 \cdot 20000}{2,47 \cdot 24} = 68,828$$

2.10 Кількість паралельних гілок обмотки статора

$$a=1.$$

2.11 Число ефективних провідників в пазу

$$U_{II} = a \cdot U_{\phi} = 1 \cdot 68,827 = 68,827$$

Приймаємо $U_{II} = 69$.

2.12 Число послідовних витків у фазі

$$W_1 = \frac{U_{II} \cdot Z_1}{2 \cdot a \cdot m} = \frac{69 \cdot 24}{2 \cdot 1 \cdot 3} = 276$$

2.13 Уточнене значення лінійного навантаження

$$A = \frac{2 \cdot I_1 \cdot w_1 \cdot m}{\pi \cdot D} = \frac{2 \cdot 2,47 \cdot 276 \cdot 3}{3,14 \cdot 0,065} = 20050,1 \frac{A}{m^2}$$

2.14 Магнітний потік

$$\Phi = \frac{k_E \cdot U_{\phi}}{4 \cdot 1,11 \cdot w_1 \cdot k_{ob} \cdot f} = \frac{0,975 \cdot 230}{4,44 \cdot 276 \cdot 0,966 \cdot 50} = 3,79 \cdot 10^{-3} \text{ Вб},$$

де 1,11 – коефіцієнт форми поля, що є відношенням діючого значення індукції до її середнього значення.

2.15 Уточнене значення індукції в повітряному проміжку

$$B_{\delta} = \frac{p \cdot \Phi}{D \cdot l_{\delta}} = \frac{2 \cdot 3,79 \cdot 10^{-3}}{0,065 \cdot 0,08} = 0,728 \text{ Тл}$$

2.16 Попередня густина струму

$$J_1 = \frac{A \cdot J_1}{A} = \frac{115000000000}{20050,1} = 5,74 \cdot 10^6 \frac{A}{m^2},$$

де $AJ_1 = 1,15 \cdot 10^{11} A/m^2$ – теплофактор із залежності [115].

2.17 Переріз ефективного провідника (попередньо)

$$q_{\text{эф}} = \frac{I_1}{a \cdot J_1} = \frac{2,47}{1 \cdot 5,74 \cdot 10^6} = 4,31 \cdot 10^{-7} m^2$$

2.18 Число елементарних провідників

$$n_{\text{эл}} = 1$$

2.19 Переріз елементарного провідника

$$q_{\text{эл}} = \frac{q_{\text{эф}}}{n_{\text{эл}}} = \frac{4,31 \cdot 10^{-7}}{1} = 4,31 \cdot 10^{-7} m^2$$

2.20 Обмотка статора виконується круглим дротом марки ПЭТМ з розмірами [89]:

- діаметр дроту без ізоляції $d_{\text{эл}} = 0,75 \cdot 10^{-3} m$;
- діаметр ізольованого дроту $d_{\text{из}} = 0,815 \cdot 10^{-3} m$;
- переріз елементарного провідника $q_{\text{эл}} = 4,42 \cdot 10^{-7} m^2$;
- переріз ефективного провідника $q_{\text{эф}} = q_{\text{эл}} \cdot n_{\text{эл}} = 4,42 \cdot 10^{-7} \cdot 1 = 4,42 \cdot 10^{-7}$.

2.21 Густина струму в обмотці статора

$$J_1 = \frac{I_1}{a \cdot q_{\text{эл}} \cdot n_{\text{эл}} \cdot 10^{-7}} = \frac{2,47}{1 \cdot 3,727 \cdot 10^{-7}} = 5,59 \cdot 10^{12} \frac{A}{m^2}$$

3 Розрахунок розмірів зубцевої зони статора і розміщення провідників обмотки в пазу

3.1 Прийняті заздалегідь по таблиці 6-10 [89] величини:

- індукції в зубці 1,85 Тл;
- індукції в ярмі 1,65 Тл.

3.2 Для розміщення провідників всипної обмотки прийнятий трапецеїдальний напівзакритий паз, форма і позначення визначуваних розмірів його в штампі дані на рис. 1.

3.3 Ширина зубця статора:

$$b_{z1} = \frac{B_{\delta} \cdot t_1 \cdot l_{\delta}}{B_{z1} \cdot l_{cm1} \cdot k_c} = \frac{0,728 \cdot 8,508 \cdot 10^{-3} \cdot 0,08}{1,85 \cdot 0,08 \cdot 0,97} = 7,112 \cdot 10^{-3} \text{ м},$$

де $k_c = 0,97$ – коефіцієнт заповнення сталлю пакету магнітопроводу (таблиця 2-1 [89]).

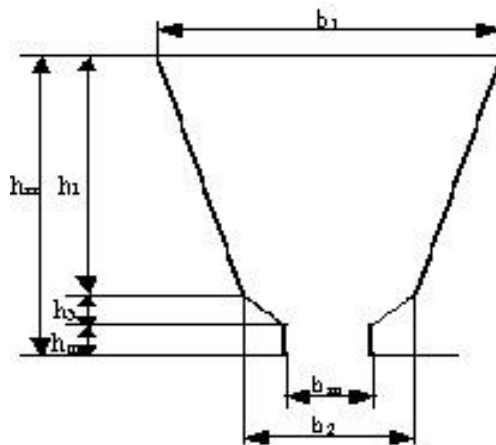


Рисунок 1 – Напівзакритий паз статора.

3.4 Висота ярма статора:

$$h_a = \frac{\Phi}{2 \cdot B_a \cdot l_{cm1} \cdot k_c} = \frac{3,79 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 1,65 \cdot 0,08 \cdot 0,97} = 15,26 \cdot 10^{-3} \text{ м}$$

3.5 По рекомендаціях, приведених в таблиці 6-12 [89] прийняті:

- висота шліца $h_{ш} = 0,0005$ м;
- ширина шліца $b_{ш} = 0,002$ м.

3.6 Висота паза:

$$h_{II} = \frac{D_a - D}{2} - h_a = \frac{124 - 65}{2} - 15,26 = 15,58 \text{ мм}$$

Прийнята висота паза $h_n = 0,0156$ м.

3.7 Розміри паза:

$$b_1 = \frac{\pi \cdot (D + 2 \cdot h_{uz} - b_{uz}) - z_1 \cdot b_{z1}}{Z_1 - \pi} = \frac{3,14 \cdot (65 + 2 \cdot 15,6 - 2) - 24 \cdot 5,46}{24 - 3,14} = 7,13 \text{ мм} ;$$

$$b_2 = \frac{\pi \cdot (D + 2 \cdot h_{11})}{Z_1} - b_{z1} = \frac{3,14 \cdot (65 + 2 \cdot 12)}{24} - 7,13 = 3,34 \text{ мм}$$

3.8 Прийняті розміри:

$$b_1 = 0,00713 \text{ м};$$

$$b_2 = 0,00334 \text{ м}.$$

3.9 Висота:

$$h_1 = h_{\Pi} - (h_{uz} + \frac{b_2 - b_{uz}}{2}) = 15,6 - (0,5 + \frac{3,34 - 2}{2}) = 14,43 \text{ мм}$$

3.10 Розміри паза у проясвіті:

$$b_1' = b_1 - \Delta b_{\Pi} = 7,1 - 0,2 = 6,9 \text{ мм};$$

$$b_2' = b_2 - \Delta b_{\Pi} = 3,34 - 0,2 = 3,14 \text{ мм};$$

$$h_1' = h_1 - \Delta h_{\Pi} = 14,43 - 0,2 = 14,23 \text{ мм}.$$

де 0,0002 м – двосторонні допуски на шихтування за шириною та висотою паза (стор. 177 [89]).

3.11 Площа паза для розміщення провідників обмотки:

$$S_{\Pi}' = \frac{b_1' + b_2'}{2} \cdot h_1' - S_{uz} - S_{np} = \frac{(6,9 \cdot 10^{-3} + 3,14 \cdot 10^{-3})}{2} \cdot 0,014 - 7,423 \cdot 10^{-6} = 6,401 \cdot 10^{-5} \text{ мм}^2$$

$$\text{де } S_{uz} = b_{uz} \cdot (2 \cdot h_{11} + b_1 + b_2) = 1,8 \cdot 10^{-4} \cdot (2 \cdot 0,015 + 6,9 \cdot 10^{-3} + 3,14 \cdot 10^{-3}) = 7,423 \cdot 10^{-6} \text{ мм}^2$$

– площа ізоляції в пазу;

$$b_{iz} = 1,8 \cdot 10^{-4} \text{ м} – \text{товщина ізоляції, за рекомендацією [89].}$$

3.12 Коефіцієнт заповнення паза:

$$k_3 = \frac{d_{uz}^2 \cdot u_{\Pi} \cdot n_{эл}}{S_{\Pi}'} = \frac{(0,815 \cdot 10^{-4})^2 \cdot 69 \cdot 1}{6,401 \cdot 10^{-5}} = 0,715$$

3.13 Розгорнута схема обмотки статора приведена на рис. 2.

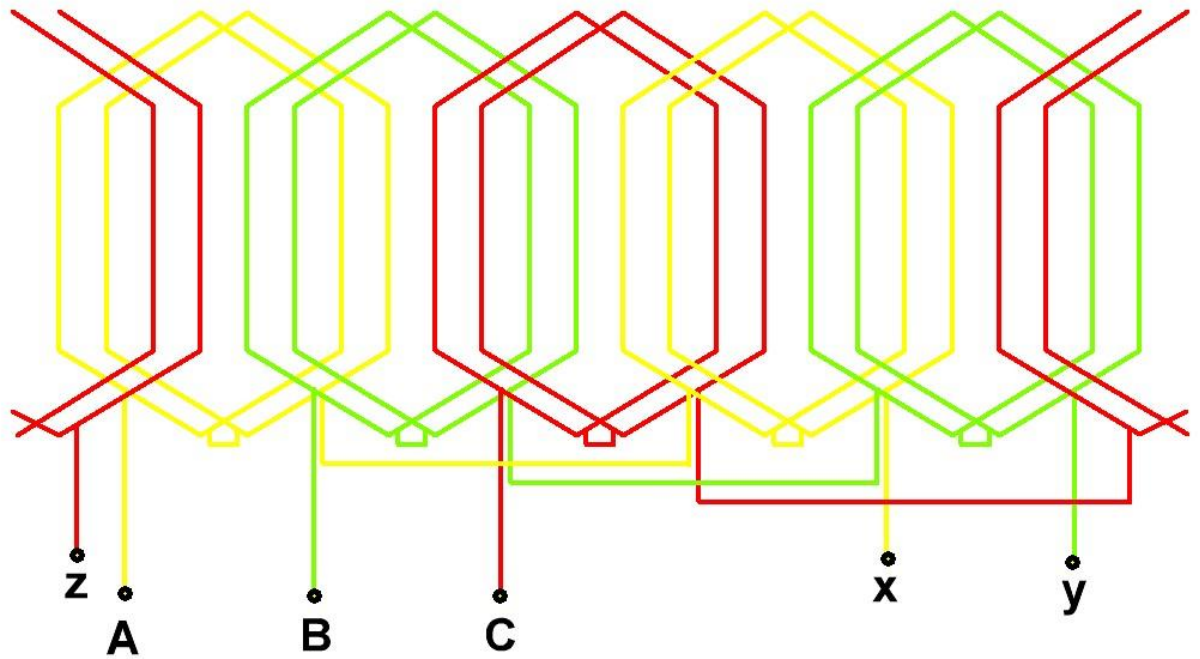


Рисунок 2 – Схема обмотки статора.

4 Розрахунок ротора

4.1 Повітряний проміжок за рекомендаціями рисунку 6-21 [89]:

$$\delta = 0,0003 \text{ м.}$$

4.2 Число пазів ротора за рекомендаціями таблиці 6-1 [92]:

$$Z_2 = 20.$$

4.3 Зовнішній діаметр:

$$D_2 = D - 2 \cdot \delta = 0,065 - 2 \cdot 0,3 \cdot 10^{-3} = 0,0644 \text{ м}$$

4.4 Довжина пакету ротора:

$$l_2 = l_1 = 0,08 \text{ м}$$

4.5 Зубцева поділка:

$$t_2 = \frac{\pi \cdot D_2}{Z_2} = \frac{3,14 \cdot 0,0644}{20} = 0,0101 \text{ м}$$

4.6 Внутрішній діаметр осердя ротора при безпосередній посадці на вал:

$$D_j = D_B = k_B \cdot D_a = 0,200 \cdot 0,124 = 0,025 \text{ м.}$$

де $k_B = 0,200$ за рекомендаціями таблиці 6-16 [89].

4.7 Обмотка ротора виконується у вигляді литої білячої клітки, стрижні клітки розташовуються в пазах, форма і позначення розмірів яких вказані на рис. 3. Для розрахунку вибраний закритий паз.

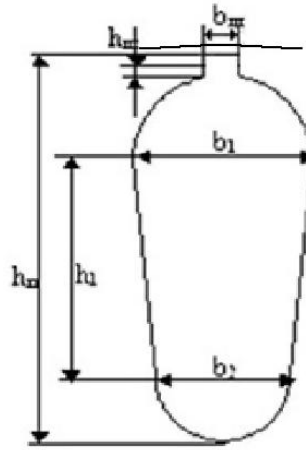


Рисунок 3 – Закритий паз ротора.

4.8 Струм в стрижні ротора:

$$I_2 = k_1 \cdot I_1 \cdot \nu_1 = 0,85 \cdot 2,472 \cdot 79,984 = 168,09 \text{ А}$$

4.9 Площа поперечного перерізу стрижня

$$q_c = \frac{I_2}{J_2} = \frac{168,09}{3,5 \cdot 10^6} = 48,02 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2,$$

де $J_2 = 3,5 \cdot 10^6 \text{ А/м}^2$ – густина струму в стрижні литої клітки згідно до рекомендацій[89].

4.10 прийняті для паза ротора (рис. 3):

- $b_{\text{ш}} = 0 \text{ м}$ - ширина шліца;
- $h_{\text{ш}} = 0 \text{ м}$ - висота шліца;
- $h'_{\text{ш}} = 0 \text{ м}$.

4.11 Допустима ширина зубця:

$$b_{Z2\text{доп}} = \frac{B_\delta \cdot t_2 \cdot l_\delta}{B_{Z2} \cdot l_{CT1} \cdot k_c} = \frac{0,728 \cdot 9,369 \cdot 0,08}{1,85 \cdot 0,08 \cdot 0,97} = 4,101 \text{ мм},$$

де $B_{z2} = 1,85 \text{ Тл}$ – індукція в зубці за рекомендаціями таблиці 6-10 [89].

4.12 Розміри паза (рис. 3 [89]):

$$b_1 = \frac{(D_2 - 2 \cdot h_u) \cdot \pi - Z_2 \cdot b_{Z2don}}{\pi + Z_2} = \frac{(0,0643 - 2 \cdot 0) \cdot 3,14 - 20 \cdot 4,101 \cdot 10^{-3}}{\pi + 20} = 5,184 \cdot 10^{-3} \text{ мм} ;$$

$$b_2 = \sqrt{\frac{b_1^2 \left(\frac{Z_2 + \pi}{2} \right) - q_c \cdot 4}{\frac{Z_2 - \pi}{2}}} = \sqrt{\frac{(5,184)^2 \cdot \left(\frac{20}{3,14} + \frac{3,14}{2} \right) - 4,802 \cdot 10^{-5} \cdot 4}{\frac{20}{3,14} - \frac{3,14}{2}}} = 2,106 \cdot 10^{-3} \text{ мм} ;$$

$$h_2 = (b_1 - b_2) \cdot \frac{Z_2}{2 \cdot \pi} = (5,184 \cdot 10^{-3} - 2,106 \cdot 10^{-3}) \cdot \frac{20}{2 \cdot 3,14} = 9,799 \cdot 10^{-3} \text{ мм}$$

4.13 Остаточні прийняті (рисунок 3[89]):

- $b_1 = 0,0053 \text{ м}$;
- $b_2 = 0,00121 \text{ м}$;
- $h_2 = 0,013 \text{ м}$.

4.14 Повна висота паза:

$$h_{п2} = h_u + \frac{b_1}{2} + h_2 + \frac{b_2}{2} = 0 + \frac{0,0053}{2} + 0,013 + \frac{0,00121}{2} = 0,01625 \text{ м}$$

4.15 Переріз стрижня:

$$\begin{aligned} q_c &= \frac{\pi}{8} \cdot (b_1^2 + b_2^2) + \frac{1}{2} \cdot (b_1 + b_2) \cdot h_2 = \\ &= \frac{3,14}{8} \cdot ((5,3 \cdot 10^{-3})^2 + (1,21 \cdot 10^{-3})^2) + \frac{1}{2} \cdot (5,3 \cdot 10^{-3} + 1,21 \cdot 10^{-3}) \cdot 0,013 = \\ &= 5,392 \cdot 10^{-5} \text{ мм}^2 \end{aligned}$$

4.16 Густина струму в стрижні:

$$J_2 = \frac{I_2}{q_c} = \frac{168,091}{5,392 \cdot 10^{-6}} = 3,117 \cdot 10^6 \text{ А/м}^2$$

4.17 Коефіцієнт співвідношення струмів стрижня і клітки:

$$\Delta = 2 \cdot \sin \frac{\pi \cdot p}{Z_2} = 2 \cdot \sin \frac{3,14 \cdot 2}{20} = 0,312$$

4.18 Струм короткозамикаючих кілець:

$$I_{кл} = \frac{I_2}{\Delta} = \frac{168,091}{0,312} = 537,257 \text{ А}$$

4.19 Густина струму короткозамикаючих кілець:

$$J_{кл} = 0,85 \cdot J_2 = 0,85 \cdot 3,117 \cdot 10^6 = 2,649 \cdot 10^6 \text{ A} / \text{м}^2.$$

де $k=0,85$ – прийнято для розрахунку, враховує зменшення густини струму в кільці в порівнянні з густиною струму стрижня.

4.20 Площа поперечного перерізу кільця:

$$q_{кл} = \frac{I_{кл}}{J_{кл}} = \frac{537,257}{2,649 \cdot 10^6} = 2,027 \cdot 10^{-4} \text{ мм}^2$$

4.21 Ескіз короткозамикаючого кільця зображений на рис. 4.

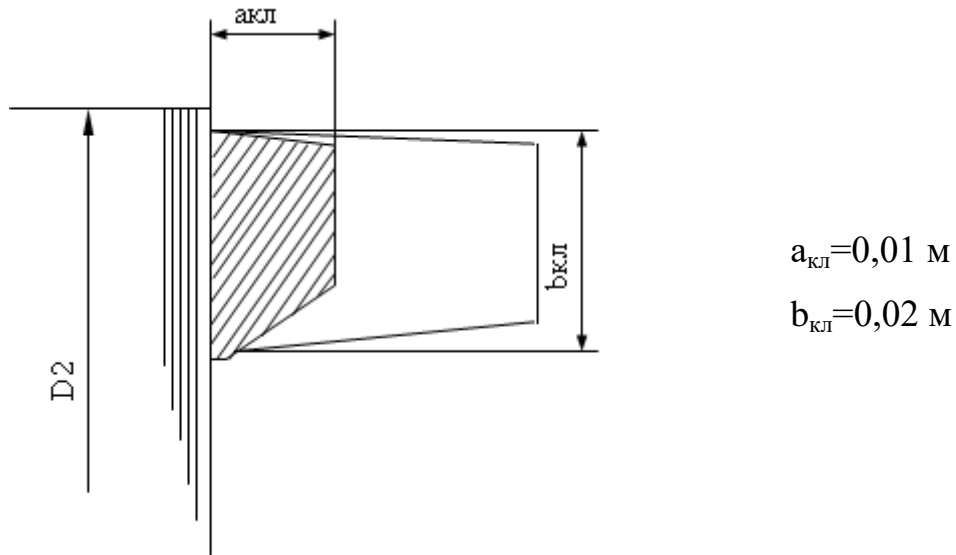


Рисунок 4 – Ескіз короткозамикаючого кільця.

4.22 Розміри короткозамикаючих кілець:

$$b_{кл} = 1,095 \cdot h_{Г2} = 1,095 \cdot 0,0162 = 0,0203 \text{ м},$$

$$a_{кл} = \frac{q_{кл}}{b_{кл}} = \frac{2,027 \cdot 10^{-4}}{0,0203} = 9,978 \cdot 10^{-3} \text{ м};$$

$$q_{кл} = b_{кл} \cdot a_{кл} = 0,0203 \cdot 9,978 \cdot 10^{-3} = 2 \cdot 10^{-4} \text{ мм}^2$$

4.23 Середній діаметр кільця:

$$D_{к.ср.} = D_2 - b_{кл} = 0,0643 - 0,02 = 0,0443 \text{ м}.$$

5 Розрахунок струму намагнічування

5.1 Розрахунок значень індукцій:

- індукція в зубці статора:

$$B_{z1} = \frac{B_{\delta} \cdot t_1 \cdot l_{\delta}}{b_{z1} \cdot l_{cm1} \cdot k_c} = \frac{0,728 \cdot 8,508 \cdot 10^{-3} \cdot 0,08}{3,45 \cdot 10^{-3} \cdot 0,08 \cdot 0,97} = 1,85 Tл;$$

- індукція в зубці ротора:

$$B_{z2} = \frac{B_{\delta} \cdot t_2 \cdot l_{\delta}}{b_{z2} \cdot l_{cm2} \cdot k_c} = \frac{0,728 \cdot 0,01 \cdot 0,08}{3,973 \cdot 10^{-3} \cdot 0,08 \cdot 0,97} = 1,9 Tл;$$

- індукція в ярмі статора:

$$B_a = \frac{\Phi}{2 \cdot h_a \cdot l_{\delta} \cdot k_c} = \frac{3,788 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 0,014 \cdot 0,08 \cdot 0,97} = 1,719 Tл$$

5.2 Розрахункова висота ярма ротора:

$$\begin{aligned} h_j &= \frac{2+p}{3,2 \cdot p} \cdot \left(\frac{D_2}{2} - h_{п2} \right) - \frac{2}{3} \cdot d_{\kappa 2} \cdot m_{\kappa 2} = \frac{2+p}{3,2 \cdot p} \cdot \left(\frac{D_2}{2} - h_{п2} \right) = \\ &= \frac{2+1}{3,2 \cdot 1} \cdot \left(\frac{0,0643}{2} - 0,01625 \right) = 0,0149 м. \end{aligned}$$

5.3 Індукція в ярмі ротора:

$$B_a = \frac{\Phi}{2 \cdot h_j \cdot l_{cm} \cdot k_c} = \frac{3,788 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 0,0149 \cdot 0,08 \cdot 0,97} = 1,638 Tл$$

5.4 Коефіцієнт повітряного проміжку:

$$k_{\delta} = k_{\delta 1} \cdot k_{\delta 2} = 1,143 \cdot 1 = 1,143,$$

$$\text{де } k_{\delta} = \frac{t_1}{t_1 - \gamma \cdot \delta} = \frac{8,508 \cdot 10^{-3}}{8,508 \cdot 10^{-3} - 3,047 \cdot 3,5 \cdot 10^{-4}} = 1,143 \text{ — коефіцієнт Картера для}$$

статора;

$$\gamma = \frac{(b_{u1} / \delta)^2}{5 + \frac{b_{u1}}{\delta}} = \frac{(2 \cdot 10^{-3} / 3,5 \cdot 10^{-4})^2}{5 + 2 \cdot 10^{-3} / 3,5 \cdot 10^{-4}} = 3,047$$

5.5 Магнітна напруженість повітряного проміжку:

$$F_{\delta} = 1,59 \cdot 10^6 \cdot B_{\delta} \cdot k_{\delta} \cdot \delta = 1,59 \cdot 10^6 \cdot 0,728 \cdot 1,143 \cdot 3,5 \cdot 10^{-4} = 463,583 A$$

5.6 За таблицями кривих намагнічування для сталі марки 2013 (додаток П-15 [89]) визначаються напруженості магнітного поля із раніше розрахованих індукцій:

- у зубці статора $H=1770\text{А/м}$;
- у зубці ротора $H=2180\text{А/м}$;
- у ярмі статора $H=1290\text{ А/м}$;
- у ярмі ротора $H=902\text{ А/м}$.

5.7 Магнітна напруженість зубцевої зони статора:

$$F_{z1} = 2 \cdot h_{z1} \cdot H_{z1} = 2 \cdot 0,015 \cdot 1770 = 55,224\text{А},$$

де $h_{z1} = 0,015\text{ м}$.

5.8 Магнітна напруженість зубцевої зони ротора:

$$F_{z2} = 2 \cdot h_{z2} \cdot H_{z2} = 2 \cdot 16 \cdot 10^{-3} \cdot 2168 = 70,492\text{А},$$

де $h_{z2} = h_{n2} - h_{ue} = 0,0175 - 0,5 \cdot 10^{-4} = 0,017\text{м}$

5.9 Коефіцієнт насичення зубцевої зони:

$$k_2 = 1 + \frac{F_{z1} + F_{z2}}{F_{\delta}} = 1 + \frac{55,224 + 70,492}{463,583} = 1,271..$$

5.10 Магнітна напруженість ярма статора:

$$F_a = L_a \cdot H_a = 0,173 \cdot 1290 = 223,706\text{А},$$

де $L_a = \frac{\pi \cdot (D_a - h_a)}{2 \cdot p} = \frac{3,14 \cdot (0,124 - 14,2 \cdot 10^{-3})}{2} = 0,173\text{м}$ – довжина середньої

магнітної лінії ярма статора.

5.11 Магнітна напруженість ярма ротора:

$$F_j = L_j \cdot H_j = 0,044 \cdot 902 = 40,231\text{А},$$

де $L_j = \frac{\pi \cdot (D_j + h_j)}{2 \cdot p} = \frac{3,14 \cdot (0,025 + 25 \cdot 10^{-3})}{2} = 0,044\text{м}$ – довжина середньої

магнітної лінії ярма ротора.

5.12 Магнітна напруженість на пару полюсів:

$$F_{\mu} = F_{\delta} + F_{Z1} + F_{Z2} + F_a + F_j = \\ = 463,583 + 55,224 + 70,492 + 223,706 + 40,231 = 853,238 \text{ A.}$$

5.13 Коефіцієнт насичення магнітного кола:

$$k_{\mu} = \frac{F_{\mu}}{F_{\delta}} = \frac{853,238}{463,538} = 1,84.$$

5.14 Струм намагнічування:

$$I_{\mu} = \frac{p \cdot F_{\mu}}{0,9 \cdot m \cdot \omega_1 \cdot k_{об1}} = \frac{1 \cdot 853,238}{0,9 \cdot 3 \cdot 276 \cdot 0,966} = 1,185 \text{ A.}$$

5.15 Відносне значення струму намагнічування:

$$I_{\mu*} = \frac{I_{\mu}}{I_{1н}} = \frac{1,185}{2,472} = 0,479_{в.о.}$$

6 Параметри робочого режиму

6.1 Активний опір фази обмотки статора:

$$r_1 = \rho_{75} \cdot \frac{L_1}{q_{\phi} \cdot a} = \frac{10^{-6}}{41} \cdot \frac{135,85}{(0,442 \cdot 10^{-6} \cdot 1)} = 7,37 \text{ Ом.}$$

де $L_1 = l_{cp1} \cdot \omega_1 = 0,484 \cdot 276 = 133,54 \text{ м}$; – довжина провідників фази обмотки;

$l_{cp1} = 2 \cdot (l_{л1} + l_{л2}) = 2 \cdot (0,08 + 0,162) = 0,484 \text{ м}$; – середня довжина витка;

$l_{л} = k_{л} \cdot b_{km} + 2 \cdot B = 1,2 \cdot 0,127 + 2 \cdot 0,005 = 0,162 \text{ м}$ – довжина лобової частини;

$k_{л} = 1,2$ – виліт лобових частин котушок з пазу по таблиці 6-19 [89];

$k_{вил} = 0,26$ – частин, таблиці 6-19 [89];

$B = 0,005 \text{ м}$ – довжина вильоту прямолінійних частин котушок з паза від торця осердя до початку відгину лобової частини, за рекомендаціями [89];

$$b_{КТ} = \frac{\pi \cdot (D + h_{л1})}{2 \cdot p} \cdot \beta_1 = \frac{3,14 \cdot (0,065 + 0,0156)}{2 \cdot 1} \cdot 1 = 0,127 \text{ м}$$
 – середня ширина

котушки;

$l_{вил} = K_{вил} \cdot b_{КТ} + B = 0,26 \cdot 0,127 + 0,005 = 0,038$ – довжина вильоту лобової частини котушки.

6.2 Відносне значення активного опору:

$$r_1 = r_1' \cdot \frac{I_{1H}}{U_{1H}} = 7,37 \cdot \frac{2,47}{230} = 0,079.$$

6.3 Активний опір фази обмотки ротора:

$$r_2 = r_c + \frac{2 \cdot r_{кл}}{\Delta^2} = 7,237 \cdot 10^{-5} + \frac{2 \cdot 1,697 \cdot 10^{-6}}{0,313^2} = 1,202 \cdot 10^{-4} \text{ Ом},$$

де $r_c = \rho_{Al} \cdot \frac{l_2}{q_c} = \frac{10^{-6}}{20,5} \cdot \frac{0,08}{5,392 \cdot 10^{-5}} = 0,72 \cdot 10^{-4} \text{ Ом}$ – опір стрижня;

$$r_{кл} = \rho_{Al} \cdot \frac{\pi \cdot D_{кл.ср}}{Z_2 \cdot q_{кл}} = \frac{10^{-6}}{20,5} \cdot \frac{3,14 \cdot 0,0443}{20 \cdot 2 \cdot 10^{-4}} = 1,697 \cdot 10^{-6} \text{ Ом}$$
 – опір к.з. кільця на

один стрижень;

$$\rho_{Al} = 4,878 \cdot 10^{-8} \text{ – питомий електричний опір обмотки ротора.}$$

6.4 Приведений активний опір фази ротора до числа витків обмотки статора:

$$r_2' = r_2 \cdot \frac{4 \cdot m \cdot (\omega \cdot k_{о\delta 1})^2}{Z_2} = 1,206 \cdot 10^{-4} \cdot \frac{4 \cdot 3 \cdot (276 \cdot 0,966)^2}{20} = 4,57 \text{ Ом}.$$

6.5 Приведений активний опір фази обмотки ротора у відносних одиницях:

$$r_2' = r_2' \cdot \frac{I_{1H}}{U_{1H}} = 4,57 \cdot \frac{2,47}{230} = 0,049 \text{ в.о.}$$

6.6 Індуктивний опір розсіювання фази обмотки статора:

$$\begin{aligned} x_1 &= 15,8 \cdot \frac{f_1}{100} \cdot \left(\frac{\omega_1}{100} \right)^2 \cdot \frac{l_\delta'}{p \cdot q} \cdot (\lambda_{\pi 1} + \lambda_{\pi 1} + \lambda_{\pi 1}) = \\ &= 15,8 \cdot \frac{50}{100} \cdot \left(\frac{276}{100} \right)^2 \cdot \frac{0,08}{1 \cdot 4} \cdot (1,445 + 1,827 + 1,158) = 5,333 \text{ Ом}, \end{aligned}$$

де $\lambda_{\pi 1} = \frac{h_3}{3 \cdot b_1} \cdot k_\beta + \left(\frac{h_2}{b_1} + \frac{3 \cdot h_1}{b_1 + 2 \cdot b_{uu}} + \frac{h_{uu}}{b_{uu}} \right) \cdot k_\beta =$

$$\frac{0,01165}{2 \cdot 0,0069} \cdot 0,875 + \left(\frac{0,001}{2 \cdot 0,0069} - \frac{3 \cdot 0,00245}{0,0069 + 2 \cdot 0,002} + \frac{0,0005}{0,002} \right) \cdot 0,875 = 1,446$$

коефіцієнт магнітної провідності пазового розсіювання;

$$h_3 = 0,01165 \text{ м} \text{ – висота паза, заповнення провідниками;}$$

$$\lambda_{\pi 1} = 0,34 \cdot \frac{q}{l_{\delta}} \cdot (l_{\pi} - 0,64 \cdot \beta \cdot \tau) =$$

$$= 0,34 \cdot \frac{4}{0,08} \cdot (0,162 - 0,64 \cdot 0,833 \cdot 0,1021) = 1,827 \quad \text{— коефіцієнт магнітної}$$

провідності лобового розсіювання;

$\beta = 0,833$ — коефіцієнт укорочення кроку;

$$\lambda_{\pi 1} = \frac{t_1}{12 \cdot \delta \cdot k_{\delta}} \cdot \xi = \frac{8,508 \cdot 10^{-3}}{12 \cdot 3,5 \cdot 10^{-4} \cdot 1,143} \cdot 0,654 = 1,158 \quad \text{— коефіцієнт магнітної}$$

провідності диференційного розсіювання;

$$\xi = k_2 \cdot q^2 + 2 \cdot k_{\beta} - k_{\sigma 61}^2 \cdot (1 + \Delta_z) = 0,03 \cdot 4 + 2 \cdot 0,83 - 0,966^2 \cdot (1 + 0,13) = 0,654.$$

6.7 Індуктивний опір розсіювання фази обмотки статора у відносних одиницях:

$$x_{1*} = x_1 \cdot \frac{I_{1H}}{U_{1H}} = 5,333 \cdot \frac{2,47}{230} = 0,057 \text{ в.о.}$$

6.8 Індуктивний опір розсіювання фази обмотки ротора:

$$x_2 = 7,9 \cdot f_1 \cdot l_{\delta}' \cdot (\lambda_{\pi 2} + \lambda_{\pi 2} + \lambda_{\pi 2}) \cdot 10^{-6} =$$

$$= 7,9 \cdot 50 \cdot 0,08 \cdot (4,384 + 0,466 + 2,093) \cdot 10^{-6} = 2,194 \cdot 10^{-4} \text{ Ом},$$

де $\sum \lambda_2 = \lambda_{\sigma 2} + \lambda_{n2} + \lambda_{r2} = 2,093 + 4,384 + 0,466 = 6,943$ — сумарний

коефіцієнт магнітної провідності за шляхом розсіювання;

$$\lambda_{\pi 2} = \left[\frac{h_1}{3 \cdot b_1} \cdot \left(1 - \frac{\pi \cdot b_1^2}{8 \cdot q_c} \right)^2 + 0,66 - \frac{b_{\pi}}{2 \cdot b_1} \right] \cdot k_{\pi} + 0,3 + \frac{1,12 \cdot 10^6 \cdot h_{\pi}}{l_2} =$$

$$= \left[\frac{0,0156}{2 \cdot 5,3 \cdot 10^{-3}} \cdot \left(1 - \frac{3,14 \cdot (5,3 \cdot 10^{-3})^2}{8 \cdot 5,392 \cdot 10^{-5}} \right)^2 + 0,66 - \frac{0}{2 \cdot 5,3 \cdot 10^{-3}} \right] \cdot 0,522 +$$

$$+ 0,3 + \frac{1,12 \cdot 10^6 \cdot 5 \cdot 10^{-4}}{168,09} = 4,384 \quad \text{— коефіцієнт}$$

магнітної провідності пазового розсіювання;

$$\lambda_{Л2} = \frac{2,3 \cdot D_{кл.ср}}{Z_2 \cdot l'_\delta \cdot \Delta^2} \cdot \lg \left(\frac{4,7 \cdot D_{кл.ср}}{2 \cdot a_{кл} + b_{кл}} \right) =$$

$$= \frac{2,3 \cdot 0,0443}{20 \cdot 0,08 \cdot 0,313^2} \cdot \lg \left(\frac{4,7 \cdot 0,0443}{2 \cdot 0,01 \cdot 10^{-3} + 0,02 \cdot 10^{-3}} \right) = 0,466 \quad \text{— коефіцієнт}$$

магнітної провідності лобового розсіювання;

$$\lambda_{Л2} = \frac{t_2}{12 \cdot \delta \cdot k_\delta} \cdot \xi = \frac{0,0101}{12 \cdot 3,5 \cdot 10^{-4} \cdot 1,143} \cdot 0,995 = 2,093 \quad \text{— коефіцієнт магнітної}$$

провідності диференціального розсіювання.

6.9 Індуктивний опір розсіювання фази ротора, приведений до числа витків статора:

$$x'_2 = x_2 \cdot \frac{4 \cdot m \cdot (\omega_1 \cdot k_{об1})^2}{Z_2} = 2,194 \cdot 10^{-4} \cdot \frac{4 \cdot 3 \cdot (276 \cdot 0,966)^2}{20} = 9,357 \text{ Ом}.$$

6.10 Приведений індуктивний опір розсіювання фази ротора у відносних одиницях:

$$x'_{2*} = x'_2 \cdot \frac{I_{1н}}{U_{1н}} = 9,357 \cdot \frac{2,47}{230} = 0,101 \text{ в.о.}$$

7 Розрахунок втрат

7.1 Основні втрати в сталі:

$$P_{ст.осн} = p_{1.0/5.0} \cdot \left(\frac{f_1}{50} \right)^{\beta_{ст}} \cdot (k_{Дa} \cdot B_a^2 \cdot m_a + k_{Дz} \cdot (B_{z1})^2 \cdot m_{z1}) =$$

$$= 2,5 \cdot \left(\frac{50}{50} \right)^{1,5} \cdot (1,6 \cdot 1,6^2 \cdot 2,981 + 1,8 \cdot 1,852^2 \cdot 0,784) = 42,623 \text{ Вт}$$

7.2 Поверхневі втрати в роторі:

$$P_{ноб2} = p_{ноб2} \cdot (t_2 - b_{u2}) \cdot Z_2 \cdot l_{см2} = 79,272 \cdot (0,00851 - 0,002) \cdot 24 \cdot 0,08 = 0,991 \text{ Вт}$$

7.3 Пульсаційні втрати в зубцях ротора:

$$P_{пуль2} = 0,11 \cdot \left(\frac{Z_2 \cdot n_1}{10000} \cdot B_{пуль2} \right)^2 \cdot m_{z2} = 0,11 \cdot \left(\frac{20 \cdot 3000}{10000} \cdot 0 \right)^2 \cdot 0,781 = 0 \text{ Вт}$$

7.4 Поверхневі втрати в статорі:

$$\begin{aligned}
 P_{\text{нов}} &= 0,5 \cdot \left(\frac{Z_1 \cdot n}{10000} \right)^{1,5} \cdot (B_{02} \cdot t_1 \cdot 10^3)^2 \cdot (t_2 - b_{\text{ш}}) \cdot Z_2 \cdot l_{\delta} = \\
 &= 0,5 \cdot \left(\frac{24 \cdot 3000}{10000} \right)^{1,5} \cdot (0 \cdot 0,00851 \cdot 10^3)^2 \cdot (0,0101 - 0) \cdot 20 \cdot 0,08 = 0 \text{ Bm}
 \end{aligned}$$

7.5 Пульсаційні втрати в зубцях статора:

$$P_{\text{пуль1}} = 0,11 \cdot \left(\frac{Z_2 \cdot n_1}{10000} \cdot B_{\text{пуль1}} \right)^2 \cdot m_{z1} = 0,11 \cdot \left(\frac{20 \cdot 3000}{10000} \cdot 0,116 \right)^2 \cdot 0,782 = 4,174 \text{ Bm}$$

7.6 Сума додаткових втрат в сталі:

$$P_{\text{ст.доб}} = P_{\text{нов1}} + P_{\text{нов2}} + P_{\text{пуль1}} + P_{\text{пуль2}} = 0,99 + 0 + 4,174 + 0 = 5,164 \text{ Bm}$$

7.7 Повні втрати в сталі:

$$P_{\text{ст.доб}} = P_{\text{ст.осн}} + P_{\text{ст.доб}} = 50,637 + 14,838 = 62,205 \text{ Bm}$$

7.8 Механічні втрати:

$$P_{\text{мех}} = K_T \cdot \left(\frac{n_1}{10} \right)^2 \cdot D_a^4 = 1,138 \cdot \left(\frac{3000}{10} \right)^2 \cdot 0,1246^4 = 24,687 \text{ Bm}$$

7.9 Додаткові втрати при номінальному режимі:

$$P_{\text{доб.н}} = 0,005 \cdot P_{1\text{н}} = 0,005 \cdot \frac{P_{2\text{н}}}{\eta} = 0,005 \cdot \frac{1100}{0,806} = 6,824 \text{ Bm}$$

7.10 Електричні втрати в статорі:

$$P_{\text{эл.ст.}} \approx 3 \cdot I_{\mu}^2 \cdot r_1 = 3 \cdot 1,185^2 \cdot 7,369 = 31,06 \text{ Bm}$$

7.11 Активна складова струму неробочого ходу:

$$I_{\text{х.ха}} = \frac{P_{\text{см1}} + P_{\text{мех}} + P_{\text{эл.ст.}}}{m \cdot U_{1\text{н}}} = \frac{47,787 + 24,687 + 31,06}{3 \cdot 230} = 0,15 \text{ A}$$

7.10 Струм неробочого ходу:

$$I_{\text{х.х}} = \sqrt{I_{\text{х.х.а}}^2 + I_{\mu}^2} = \sqrt{0,15^2 + 1,185^2} = 1,195 \text{ A}$$

7.11 Коефіцієнт потужності при неробочому ході:

$$\cos \varphi_{\text{х.х}} = \frac{I_{\text{х.х.а}}}{I_{\text{х.х}}} = \frac{0,15}{1,195} = 0,126$$

8 Розрахунок робочих характеристик

8.1 Активний опір взаємоіндукції:

$$r_{12} \approx \frac{P_{ст.очн}}{m \cdot I_{\mu}^2} = \frac{42,623}{3 \cdot 1,185^2} = 10,11 \Omega_m$$

8.2 Реактивний опір взаємоіндукції:

$$x_{12} \approx \frac{U_{1H}}{I_{\mu}} - x_1 = \frac{230}{1,185} - 5,333 = 188,71 \Omega_m$$

8.3 Відношення вектору напруги фази до вектору ЕРС:

$$c_1 = 1 + \frac{x_1}{x_{12}} = 1 + \frac{5,333}{188,714} = 1,028$$

8.4 Емпіричний коефіцієнт:

$$\begin{aligned} \gamma_0 &= \arctan \left(\frac{(r_1 \cdot x_{12} - r_{12} \cdot x_1)}{r_{12} \cdot (r_1 + r_{12}) + x_{12} \cdot (x_1 + x_{12})} \right) = \\ &= \arctan \frac{7,37 \cdot 188,71 - 10,11 \cdot 5,33}{10,11 \cdot (7,37 + 10,11) + 188,71 \cdot (5,33 + 188,71)} = 0,036 < 1^\circ \end{aligned}$$

8.5 Активна складова струму синхронного н.х.:

$$I_{0a} = \frac{P_{ст.очн} + 3 \cdot I_{\mu}^2 \cdot r_1}{m \cdot U_{1H}} = \frac{42,623 + 3 \cdot 1,185^2 \cdot 7,369}{3 \cdot 220} = 0,1067 A$$

8.6 Розрахункові величини до Г-подібної схеми заміщення АД:

$$a' = c_1^2 = 1,05731^2 = 1,118;$$

$$a = c_1 \cdot r_1 = 1,028 \cdot 7,369 = 7,577;$$

$$b = c_1 \cdot (x_1 + c_1 \cdot x'_2) = 1,028 \cdot (5,33 + 1,028 \cdot 9,357) = 15,377 .$$

8.7 Втрати, постійні при зміні ковзання:

$$P_{ст} + P_{мех} = 47,788 + 24,687 = 72,474 Bm$$

8.8 Розраховані значення $\cos \varphi$, η, s та їх відхилення показані в таблиці 1.

Таблиця 1 – Розраховані значення $\cos\varphi$, η , s і їх відхилення.

	Задані	Розраховані	Відхилення	Рекомендовані відхилення
$\cos\varphi$	0,8	0,81	0,01	$\geq -0,02, \leq +0,07$
ККД	0,806	0,808	0,25%	$\geq -1,8$
	0,043	0,0425	-1,16%	$\leq +20\%$

9 Розрахунок пускових характеристик

При пуску асинхронного двигуна ротор нерухомий отже ковзання буде дорівнювати 1.

Прийmemo

$$s=1$$

9.1 Висота стрижня в пазі:

$$h_c = h_{n2kp} - h_{u2} = 0,01625 - 0,001 = 0,01525$$

9.2 Приведена висота стрижня:

$$\xi = 63,61 \cdot h_c \cdot \sqrt{s} = 63,61 \cdot 0,01525 \cdot \sqrt{1} = 0,97;$$

9.3 Із залежності $\varphi = f(\xi)$:

$$\varphi = 0,11$$

9.4 Коефіцієнт демпфування:

$$k_{\delta} = 0,08$$

9.5 Глибина проникнення струму:

$$h_r = \frac{h_c}{1 + \varphi} = \frac{0,01525}{1 + 0,11} = 0,01374 \text{ м}$$

9.6 Площа перерізу стрижнів:

$$\begin{aligned}
 q_r &= \frac{\pi \cdot b_2^2}{8} + \frac{b_2 + b_r}{2} \cdot \left(h_r - \frac{b_2}{2} \right) = \\
 &= \frac{3,14 \cdot (5,3 \cdot 10^{-3})^2}{8} + \frac{(5,3 \cdot 10^{-3} + 2,398 \cdot 10^{-3})}{2} \cdot \left(0,01374 - \frac{5,3 \cdot 10^{-3}}{2} \right) = 53,728 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2
 \end{aligned}$$

$$b_r = b_1 - \frac{b_1 - b_2}{h_1} \cdot \left(h_r - \frac{b_1}{2} \right) =$$

$$= 5,3 \cdot 10^{-3} - \frac{5,3 \cdot 10^{-3} - 1,21 \cdot 10^{-3}}{0,01563} \cdot \left(0,01374 - \frac{5,3 \cdot 10^{-3}}{2} \right) = 2,398 \cdot 10^{-3} \text{ м.}$$

9.7 Коефіцієнт k_r :

$$k_r = \frac{q_c}{q_r} = \frac{53,92}{53,72} = 1,00358$$

9.8 Коефіцієнт загального збільшення активного опору фази ротора під впливом ефекту витіснення струму:

$$K_R = 1 + \frac{r_c}{r_2} \cdot (k_r - 1) = 1 + \frac{72,37 \cdot 10^{-6}}{107,051 \cdot 10^{-6}} \cdot (1,00358 - 1) = 1,00242.$$

9.9 Активний опір фази обмотки ротора з урахуванням витіснення буде рівний:

$$r_{2\xi}' = K_R \cdot r_2' = 1,00242 \cdot 4,56 = 4,5768$$

9.10 Коефіцієнт магнітної провідності пазового розсіювання з урахуванням ефекту витіснення:

$$\lambda_{\Pi 2\xi} = \left[\frac{h_1}{3 \cdot b_1} \left(1 - \frac{\pi \cdot b_1^2}{8 \cdot q_c} \right)^2 + 0,66 - \frac{b_w}{2 \cdot b_1} \right] \cdot k_D + \frac{h_w}{I_{\text{III}} \cdot I_2} =$$

$$= \left[\frac{15,63 \cdot 10^{-3}}{3 \cdot 5,3 \cdot 10^{-3}} \cdot \left(1 - \frac{3,14 \cdot (5,3 \cdot 10^{-3})^2}{8 \cdot 53,92} \right) + 0,66 - \frac{0}{2 \cdot 5,3 \cdot 10^{-3}} \right] \cdot 0,08 + \frac{5 \cdot 10^{-4}}{1,00855 \cdot 10^{-3}} =$$

$$= 0,97062;$$

9.11 Коефіцієнт що враховує зміну індуктивного опору фази обмотки ротора від дії ефекту витіснення струму:

$$K_x = \frac{\lambda_{\Pi 2\xi} + \lambda_{\Pi 2} + \lambda_{D2}}{\lambda_{\Pi 2} + \lambda_{\Pi 2} + \lambda_{D2}} = \frac{\sum \lambda_{2\xi}}{\sum \lambda_2} = \frac{1,809 + 0,265 + 2,413}{1,878 + 0,265 + 2,413} = 0,985;$$

9.12 Індуктивний опір обмотки ротора з урахуванням ефекту витіснення:

$$x_{2\xi}' = x_2' \cdot K_x = 9,35 \cdot 0,985 = 9,21 \text{ Ом}$$

9.13 Струм статора, що відповідає розрахунковому режиму, без урахування насичення:

$$I_2' = \frac{U_{1H}}{\sqrt{\left(r_1 + \frac{r_1'}{s}\right)^2 + (x_1 + x_{2\xi}')^2}} = \frac{230}{\sqrt{\left(7,495 + \frac{3,95}{1}\right)^2 + (4,911 + 9,21)^2}} = 14,709 A$$

9.14 Середня МРС обмотки, приведена до одного паза обмотки статора:

$$F_{П.СР.} = 0,7 \cdot \frac{k_{нас} \cdot I_1 \cdot u_{П.}}{a} \cdot \left(k_{\beta}' + k_{об1} \cdot \frac{Z_1}{Z_2} \right) =$$

$$= 0,7 \cdot \frac{1,25 \cdot 14,709 \cdot 48}{1} \cdot \left(1 + 0,96 \cdot \frac{36}{28} \right) = 1878,7 A$$

9.15 Коефіцієнт:

$$C_N = 0,64 + 2,5 \cdot \sqrt{\frac{\delta}{t_1 + t_2}} = 0,64 + 2,5 \cdot \sqrt{\frac{0,3 \cdot 10^{-3}}{0,0073 + 0,009369}} = 0,982$$

9.16 Фіктивна індукція потоку розсіювання в повітряному проміжку:

$$B_{\phi\delta} = \frac{F_{П.СР.}}{1,6 \cdot \delta \cdot C_N} \cdot 10^{-6} = \frac{1878,7 \cdot 10^{-6}}{1,6 \cdot 0,3 \cdot 10^{-3} \cdot 0,946} = 3,41 Tл$$

9.17 Із залежності $\chi_{\delta} = f(B_{\phi\delta})$ знаходимо коефіцієнт χ_{δ}

$$\chi_{\delta} = 0,65$$

9.18 Додаткове розкриття паза статора:

$$c_1 = (t_1 - b_{u1}) \cdot (1 - \chi_{\delta}) = (0,00732 - 2,5 \cdot 10^{-3}) \cdot (1 - 0,65) = 1,689 \cdot 10^{-3} м$$

9.19 Викликане насиченням від поля розсіювання зменшення коефіцієнта провідності розсіювання:

$$\Delta\lambda_{П1нас} = \frac{h_{u1} + 0,58 \cdot h'}{b_{u1}} \cdot \frac{c_1}{c_1 + 1,5 \cdot b_{u1}} =$$

$$= \frac{0,005 + 0,58 \cdot 2,13 \cdot 10^{-3}}{2,5 \cdot 10^{-3}} \cdot \frac{1,689 \cdot 10^{-3}}{1,689 \cdot 10^{-3} + 1,5 \cdot 2,5 \cdot 10^{-3}} = 0,216$$

9.20 Додаткове розкриття паза ротора:

$$c_2 = (t_2 - b_{u2}) \cdot (1 - \chi_{\delta}) = (0,009369 - 1 \cdot 10^{-3}) \cdot (1 - 0,65) = 2,929 \cdot 10^{-3} м$$

9.21 Зменшення коефіцієнта провідності $\Delta\lambda_n$ для паза ротора:

$$\Delta\lambda_{n2нас} = \frac{h_{u2}}{b_{u2}} \cdot \frac{c_2}{c_2 + b_{u2}} = \frac{0,0005}{0,001} \cdot \frac{0,00345}{0,001 + 0,00345} = 0,4$$

9.22 Зменшення коефіцієнта магнітної провідності пазового розсіювання при насиченні $\Delta\lambda_{n1нас}$ для статора:

$$\lambda_{n1нас} = \lambda_{n1} - \Delta\lambda_{n1нас} = 0,815 - 0,215 = 0,599$$

9.23 Зменшення коефіцієнта магнітної провідності пазового розсіювання при насиченні $\Delta\lambda_{n2нас}$ для ротора:

$$\lambda_{П2\xiнас} = \lambda_{П2\xi} - \Delta\lambda_{П2нас} = 1,809 - 0,373 = 1,437$$

9.24 Зменшення коефіцієнта провідності диференціального розсіювання при насиченні ділянок зубців статора:

$$\lambda_{Д2нас} = \lambda_{Д2} \cdot \aleph_{\delta} = 2,413 \cdot 0,65 = 1,568$$

9.25 Зменшення коефіцієнта провідності диференціального розсіювання при насиченні ділянок зубців ротора:

$$\lambda_{Д2нас} = \lambda_{Д2} \cdot \aleph_{\delta} = 2,413 \cdot 0,65 = 1,568$$

9.26 Індуктивний опір обмотки статора з урахуванням насичення:

$$x_{1нас} = x_1 \cdot \frac{\sum \lambda_{нас}}{\sum \lambda_1} = 4,911 \cdot \frac{(1,236 + 1,375 + 0,975)}{1,452 + 2,116 + 0,975} = 4,725$$

9.27 Індуктивний опір обмотки ротора з урахуванням насичення:

$$x_{2\xiнас}' = x_2' \cdot \frac{\sum \lambda_{2\xiнас}}{\sum \lambda_2} = 5,837 \cdot \frac{(1,437 + 1,568 + 0,265)}{(1,878 + 2,413 + 0,265)} = 3,656$$

9.28 Індуктивний опір взаємної індукції:

$$x_{12П} = x_{12} \cdot \frac{F_{П}}{F_{\delta}} = 188,06 \cdot \frac{853,23}{463,583} = 347,334$$

9.29 Коефіцієнт:

$$c_{1Пнас} = 1 + \frac{x_{1нас}}{x_{12П}} = 1 + \frac{4,725}{347,334} = 1,013$$

$$a_{П} = r_1 + c_{1Пнас} \cdot \frac{r_{2\xi}'}{s} = 7,495 + 1,021 \cdot \frac{4,071}{1} = 11,65$$

9.30 Струм обмотки ротора:

$$I_{2П}' = \frac{U_{1Н}}{\sqrt{a_{П}^2 + b_{П}^2}} = \frac{230}{\sqrt{11,65^2 + 8,154^2}} = 15,67 A$$

9.31 Струм обмотки статора:

$$I_1 = I_{2\Pi} \cdot \frac{\sqrt{a_{\Pi}^2 + (b_{\Pi} + x_{12\Pi})^2}}{c_{1\Pi\text{нас}} \cdot x_{12\Pi}} = 15,47 \cdot \frac{\sqrt{12,008^2 + (8,432 + 347,334)^2}}{1,01 \cdot 347,334} = 15,648 A$$

9.32 Струм обмотки статора у в.о.:

$$I_{1\Pi*} = \frac{I_{1\Pi}}{I_{1H}} = \frac{15,64}{2,47} = 6,28 \text{ в.о.}$$

9.33 Пусковий момент у в.о.:

$$M_{\Pi*} = \left(\frac{I_{2\Pi}}{I_{2\Pi}'} \right)^2 \cdot K_R \cdot \frac{s_H}{s_{\Pi}} = \left(\frac{15,67}{2,35} \right)^2 \cdot 1,0024 \cdot \frac{0,049}{1} = 2,18 \text{ в.о.}$$

10 Тепловий та вентиляційний розрахунки

10.1 Перевищення температури внутрішньої поверхні статора над температурою повітря всередині двигуна:

$$\Delta\theta_{нов1} = \frac{K \cdot (P'_{\text{э.н1}} + P_{\text{ст.осн}})}{\pi \cdot D \cdot l_{\delta} \cdot \alpha_1} = \frac{0,22 \cdot (46,33 + 42,62)}{3,14 \cdot 0,126 \cdot 0,08 \cdot 130} = 9,21^{\circ} C,$$

де $K=0,22$ – для асинхронних двигунів (таблиця 6-30 [89]);

$\alpha_1=130 \text{ Вт/м}^2\text{с}$ – коефіцієнт теплопередачі з поверхні.

Втрати в лобових частинах катушок:

$$P'_{\text{э.н1}} = k_p \cdot P_{\text{э1}} \cdot 2 \cdot \frac{l_1}{l_{\text{сп1}}} = 1,07 \cdot 130,95 \cdot 2 \cdot \frac{0,08}{0,48} = 46,33 \text{ Вт}$$

$P_{\text{елн}}=130,95 \text{ Вт}$ – електричні втрати в пазовій частині;

$k_p=1,07$ - коефіцієнт збільшення втрат за рекомендаціями [89].

10.2 Перевищення температури ізоляції в пазовій частині статора

$$\begin{aligned} \Delta\theta_{\text{из.н1}} &= \frac{P'_{\text{э.н1}}}{Z_1 \cdot \Pi_{\text{н1}} \cdot l_{\delta}} \cdot \left(\frac{b_{\text{из}}}{\lambda_{\text{экг}}} + \frac{b_1 + b_2}{16 \cdot \lambda'_{\text{экг}}} \right) = \\ &= \frac{46,33}{24 \cdot 0,04124 \cdot 0,08} \cdot \left(\frac{0,0002}{0,16} + \frac{0,0069 + 0,00314}{16 \cdot 1,1} \right) = 1,037^{\circ} C, \end{aligned}$$

де $\lambda_{\text{екв}} = 0,16 \text{ Вт/(м}^\circ\text{С)}$ – середня еквівалентна теплопровідність пазової ізоляції;

$\lambda'_{\text{екв}} = 1,1 \text{ Вт/(м}^\circ\text{С)}$ – коефіцієнт теплопровідності внутрішньої ізоляції катушки (рис. 6-62 [89]).

10.3 Перепад температури по товщині лобових частин:

$$\Delta\theta_{\text{из.л1}} = \frac{P'_{\text{э.л1}}}{2 \cdot Z_1 \cdot \Pi_{\text{н1}} \cdot l_{\text{л1}}} \cdot \frac{h_n}{12 \cdot \lambda'_{\text{екв}}} = \frac{93,78}{2 \cdot 72 \cdot 0,0659 \cdot 0,155} \cdot \frac{0,0252}{12 \cdot 1,1} = 0,634^\circ\text{C},$$

де $\Pi_{\text{л1}} = \Pi_{\text{н1}} = 0,0659 \text{ м}$ – розрахунковий периметр умовної поверхні охолодження лобової частини однієї катушки;

10.4 Перевищення температури зовнішньої поверхні лобових частин над температурою повітря всередині двигуна:

$$\Delta\theta_{\text{нов.л1}} = \frac{K \cdot P'_{\text{э.л1}}}{2 \cdot \pi \cdot D \cdot l_{\text{бл1}} \cdot \alpha_1} = \frac{0,18 \cdot 664,985}{2 \cdot 3,14 \cdot 0,262 \cdot 0,0551 \cdot 90} = 10,248^\circ\text{C}$$

10.5 Середнє перевищення температури обмотки статора над температурою повітря всередині двигуна:

$$\begin{aligned} \Delta\theta'_1 &= (\Delta\theta_{\text{нов1}} + \Delta\theta_{\text{из.н1}}) \cdot 2 \cdot \frac{l_\delta}{l_{\text{сп1}}} + (\Delta\theta_{\text{из.л1}} + \Delta\theta_{\text{нов.л1}}) \cdot 2 \cdot \frac{l_{\text{л1}}}{l_{\text{сп1}}} = \\ &= (15,441 + 3,05) \cdot 2 \cdot \frac{0,16}{0,63} + (0,862 + 14,682) \cdot 2 \cdot \frac{0,155}{0,63} = 10,674^\circ\text{C} \end{aligned}$$

10.6 Перевищення температури повітря всередині двигуна над температурою оточуючого середовища:

$$\Delta\theta_\epsilon = \frac{\sum P'_\epsilon}{S_{\text{кор}} \cdot \alpha_\epsilon} = \frac{182,557}{1,117 \cdot 17} = 37,159^\circ\text{C},$$

де

$$\begin{aligned} \sum P'_\epsilon &= \sum P' - (1 - K) \cdot (P'_{\text{эн1}} + P_{\text{ст.осн}}) - 0,9 \cdot P_{\text{мех}} = \\ &= 2591,318 - (1 - 0,18) \cdot (685,402 + 330,387) - 0,9 \cdot 70,623 = 182,557 \text{ Вт} \end{aligned}$$

втрата відведених всередині двигуна;

$$\begin{aligned}\sum P' &= \sum P_n + (k_p - 1) \cdot (P_{\text{элн}} + P_{\text{элн}}) = \\ &= 2339,198 + (1,15 - 1) \cdot (1174,249 + 506,552) = 2591,318 \text{ Вт} \quad \text{— сума втрат.}\end{aligned}$$

10.7 Необхідна для охолодження витрата повітря:

$$Q_g = k_m \cdot \frac{\sum P'_g}{1100 \cdot \Delta \theta_g} = 4,83 \cdot \frac{182,55}{1100 \cdot 37,159} = 0,02159 \text{ м}^3/\text{хв}$$

$$\text{де} \quad k_m = m_g \cdot \sqrt{\frac{n_1 \cdot D_a}{100}} = 2,5 \cdot \sqrt{\frac{3000 \cdot 0,1246}{100}} = 4,83 \quad \text{— коефіцієнт, що}$$

враховує зміну умов охолодження;

$m_g = 2,5$ — емпіричний коефіцієнт за рекомендаціями [89].

10.8 Витрата повітря що забезпечується вентилятором

$$Q'_g = \frac{0,6 \cdot D_a^3 \cdot n_1}{100} = \frac{0,6 \cdot 0,1246^3 \cdot 3000}{100} = 0,03482 \text{ м}^3/\text{хв}$$

10.9 Середнє перевищення температури обмотки статора над температурою оточуючого середовища:

$$\Delta \theta_1 = \Delta \theta'_1 + \Delta \theta_g = 10,67 + 37,16 = 47,833^\circ \text{C}$$

10.10 Мінімальна частота обертання ротора за якої буде забезпечуватись необхідний потік повітря для охолодження:

$$n_{\min} = \frac{Q_g \cdot 100}{0,6 \cdot D_a^3} = \frac{0,02159 \cdot 100}{0,6 \cdot 0,1246^3} = 1860 \text{ об/хв}$$

ДОДАТОК В.

АКТИ ВПРОВАДЖЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДИСЕРТАЦІЙНОЇ РОБОТИ

Результати виконаних досліджень впроваджені в міжнародній компанії «DelFast» в роботі з мінімізації споживання енергії в нелінійних електричних колах електробайків за рахунок використання методики підбору конфігурації джерела живлення, ДП НДІ «Квант» (м. Київ) в частині застосування методів числових розрахунків нелінійних електричних кіл з автономними регульованими електромеханічними перетворювачами енергії, навчальний процес кафедри теоретичної електротехніки КПІ ім. Ігоря Сікорського шляхом доповнення розділу «Нелінійні електричні кола» навчально-методичного комплексу дисципліни «Теоретичні основи електротехніки».

«ЗАТВЕРДЖУЮ»

Декан факультету електро-
енерготехніки та автоматики
Національного технічного
університету України «Київський
політехнічний інститут імені Ігоря
Сікорського»

« О.С. Яндульський
2019 р.

АКТ

впровадження результатів дисертаційної роботи Трінчука Д.Я. з підвищення ефективності перетворення енергії в нелінійних електричних колах у навчальний процес кафедри теоретичної електротехніки

Голова та члени комісії у складі завідувача кафедри теоретичної електротехніки Островерхова М.Я., завідувача лабораторіями Скринника О.М., відповідальної за навчально-методичну роботу Перетятко Ю.В., вченого секретаря Спінул Л.Ю. склала акт про впровадження результатів дисертаційної роботи Трінчука Д.Я. до навчально-методичного комплексу дисципліни «Теоретичні основи електротехніки» ОКР «бакалавр» у вигляді задач до практичного заняття, завдань до лабораторної роботи та блоку лекційного матеріалу розділу «Нелінійні електричні кола».

Результати впровадження результатів дисертаційної роботи дозволяють студентам вивчати ефективність перетворення енергії в нелінійних електричних колах з автономними регульованими електромеханічними перетворювачами при різних режимах роботи останніх та при різних конфігураціях джерел живлення. За результатами роботи студенти матимуть змогу вивчати вплив різних параметрів нелінійного кола на кількість спожитої енергії та досліджувати способи мінімізації втрат.

Голова комісії:

Члени комісії:



М.Я. Островерхов

О.М. Скринник

Ю.В. Перетятко

Л.Ю. Спінул

«ЗАТВЕРДЖУЮ»

Перший заступник директора
ДІ „НДІ „Квант” з наукової роботи,
кандидат технічних наук

 В.Т. Стефанович
_____ 2019 р.

АКТ

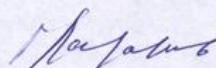
використання результатів дисертаційної роботи Трінчука Д.Я. з дослідження ефективності перетворення енергії в нелінійних колах з автономними регульованими електромеханічними перетворювачами

Комісія у складі начальника відділу № 8 Лазарева Г.В., начальника сектору Рибки Я.В. склала цей акт про впровадження результатів дисертаційної роботи Трінчука Д.Я. в частині застосування методів розрахунку споживання електричної енергії в нелінійних колах з електромеханічними перетворювачами та автономним живленням при обґрунтуванні вибору системи живлення тягових електроприводів.

Особливістю розроблених методів є врахування перехідних процесів в елементах живлення та електромеханічному перетворювачі при використанні широтно-імпульсного модулятора, що дозволяє врахувати вплив імпульсної форми навантаження на джерело живлення та розробити систему керування живленням, яка зменшує негативні наслідки цього впливу на енергоефективність. Результати досліджень показали, що використання батареї суперконденсаторів паралельно підключеної до акумулятора, дозволяє зменшити споживання енергії. Існує певна ємність батареї суперконденсаторів, яка є раціональною з енергетичної точки зору для використання в нелінійному електричному колі з автономним регульованим електромеханічним перетворювачем.


Науково-технічний ефект результатів досліджень полягає у підвищенні ефективності перетворення енергії в нелінійних електричних колах з автономними джерелами живлення та регульованими електромеханічними перетворювачами на основі удосконаленої математичної моделі та аналізу споживання електричної енергії усталених та динамічних процесів, характерних для міського їздового циклу електротранспортних засобів.

Начальник відділу № 8



Лазарев Г.В.

Начальник сектору



Рибка Я.В.



«ЗАТВЕРДЖУЮ»

Директор ТОВ «Делфаст»

С.В. Денисенко

7 грудня 2018 р.

АКТ

впровадження результатів дисертаційної роботи Трінчука Д.Я.
«Підвищення ефективності перетворення енергії в нелінійних
електричних колах з автономними регульованими
електромеханічними перетворювачами»

Комісія у складі директора Денисенко С.В., техніка Воробйова О. В. склала цей акт про впровадження результатів дисертаційної роботи Трінчука Д.Я. в частині мінімізації споживання енергії нелінійними електричними колами з автономними регульованими електромеханічними перетворювачами за рахунок використання методики підбору конфігурації джерела живлення. Розроблений метод враховує ємність та масу суперконденсатора та розрахункове визначення необхідної батареї суперконденсаторів з такими параметрами, аби споживання енергії було мінімальним. Також, новою є розроблена методика покращення енергоефективності за рахунок використання системи дозаряду суперконденсатора під час пауз споживання енергії електричним колом.

Наукова новизна результатів досліджень полягає у зменшенні споживання енергії в нелінійних електричних колах з автономними джерелами живлення та регульованими електромеханічними перетворювачами в усталених та динамічних процесах, характерних для міського їздового циклу електротранспортних засобів, за рахунок встановлення необхідної для цього конфігурації джерела живлення.

Директор

С.В. Денисенко

Технік

О.В. Воробйов